



ÓBUDAI EGYETEM
KANDÓ KÁLMÁN VILLAMOSMÉRNÖKI KAR



XLI. Kandó
Konferencia
KK2025

Kandó Konferencia 2025

Kiadvány kötet



BOSCH



ERICSSON

Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar

1084 Budapest, Tavaszmező u. 17.

2026



JUBILEUMI
TUDOMÁNYÜNNEP
2025

200 ÉV A TUDÁS ÉS A TÁRSADALOM SZOLGÁLATÁBAN



200 ÉVES
A MAGYAR
TUDOMÁNYOS
AKADÉMIA



Szerkesztette: Dr. habil. Wühl Tibor

Felelős kiadó: Prof.Dr. Szabolcsi Róbert

Óbudai Egyetem, Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar

ISBN 978-963-449-398-3

Budapest

2026

Tartalom

Enneagram personality revealing system in the educational systems.....	2
Kohonen's self-organizing maps in education	7
Quantum Digitization of Electromagnetic Field States: A Computational Tool for Investigating Encoding-Dependent Quantum Information Measures	12
Data-Driven Approaches to Student Retention: Analysis of Dropout Trends in the Measurements Laboratory	33
Implementing Digital Teaching-Quiz Strategies in the Measurements Laboratory: New Perspectives on Student Motivation and Knowledge Retention	48
Tiltott sáv mérnökség félvezető ötvözetekkel és önszerveződő alacsonydimenziós nanoszerkezetekkel	62
Advanced Fault Protection and Stability in PV-Enhanced Urban Power System.....	84
IoT-architektúra Intelligens Meteorológiai Állomásokhoz Firebase Segítségével Nagyobb Mennyiségű Adatkezeléshez	99
Reconstruction and development of a wireless network in the machining hall of an industrial company	116
Embedding passive electronic components into 3D printed structures using FDM technology	129
Implementation and Development of Mobile Networks	141
IoT (Internet of Things) awareness.....	153
Modernizing the FASTBUS readout system of the CERN NA49/NA61 experiment ToF detector using Raspberry Pi.....	164
Security issues in multimedia IP networks	178
Időzírtési problémák kezelése kritikus kommunikációs hálózatokban	185
Aspects of Selection for RF Band Direction Finding Techniques	199

Ízületi stabilizáló rendszer fejlesztése	212
Safety Science of Servo Motor Systems	224
Numerical Ellipsometry Analysis (NEA) of Nanoscale Gold Gratings.....	237
Incidents of Industrial Systems Part 1: Industrial Cybersecurity	249
Kisfeszültségű Hálózatok Ívzárlati Veszélyei és Védelme	255
Zárlati Áramok Korlátozása Elosztó Hálózatokban	263
Duzzasztás nélküli, úszó vízienergia-hasznosító (DNÚVH) berendezések védelme	272
Egy kihalt mesterség 3. rész – A vízimolnárok további szerszámai	285
Nagytávolságú pont-pont vízfelszíni kapcsolat LoRa alapon	295
New Trends in Energy Harvesting Through Magnetic Nanofluids.....	312
Műtárgyvédelem a raktározás és szállítmányozás relációjában	324
The importance of distributed intelligence traffic control systems in secondary railway transport	335
A statikus HAZOP-tól az intelligensig, avagy a fuzzyn keresztül az ACS- FORCE keretrendszerig.	346
Hydrogen Incident Severity Indicator (HISI), az új hidrogénspecifikus eseményskála.....	354
A hidrogén szerepe az energiabiztonság növelésében a megújuló energiaforrások integrációja mellett	362
Neural Network-Based Estimation of Onshore and Offshore Wind Power Generation in Germany	374
Háromfázisú aszinkron motorok mechanikai eredetű életciklus- modelljének elemzése	385
AMPECA – Beágyazott fizioterápiás izomstimulációs rendszer	397
The Employee as a Data Source: A Prospective View on Biosensor Technologies in the Workplace	412

July 7, 2005 from a telecommunications perspective	420
Designing a physiological research laboratory and developing its control program at the University of Manchester	439
The Biópio Photovoltaic Power Plant: A Strategic Model for Sustainable Energy Development in Angola and Sub-Saharan Africa	454
Anyag- és energiaáramok a napelemes rendszerekben: szakirodalmi áttekintés az LCA szemszögéből	468
Ethical and security dilemmas in the application of AI in a financial institution environment - customer perspective.....	488
Blind source separation methods used in functional brain imaging	504
Integrating satellite imagery and Machine Learning for infrastructure risk forecasting in Honduras.....	518
Akusztikus-hangforrás lokalizátor digitális jelfeldolgozással	525
Students and Traditions in Mathematics Education.....	538
Functional testing of PLC programs using FPGA-based Hardware-in-the- Loop simulation	547
Az indítókalicka vezetőanyagának hatása a szinkron motor indítási és elektromágneses jellemzőire.....	559
Diagnosztikai mérések elektromos és hibrid járművek nagyfeszültségű egységein	581
Adatbáziskezelés oktatása tükrözött osztályterem módszerrel	590
A Simplon alagút vasútvonal villamosítása Kandó Kálmán háromfázisú rendszerével	599
Az ún. “második vészhelyzet” biztonságos megoldhatóságának kérdése katonai légijárművek ejtőernyős vész-gépelhagyási folyamata során	611
Absztraktok	627
UWB kommunikáció kihívásai	628

3D-s röntgenmikroszkópia alkalmazási lehetőségei az autóelektronikai termékek fizikai analízise során	629
Product development, reliability and validation at Bosch Budapest Development Center	630
Ericsson: kutatás-fejlesztés, innováció és trendek a telekommunikációban	631
Autonóm távközlési hálózatok üzemeltetése MI és tudásbázis segítségével	632
Kandós mérnökök a munkaerőpiacon: kihívások és lehetőségek	633
Country-Specific Format Challenges of License Plate Recognition	634
Virtuális valóság a katasztrófavédelemben -Szimulációs gyakorló és oktató program	636
A Vasúti jelzőrendszerek energiaellátásának kiberbiztonsági kockázatelemzése	637
Information About Some Research Activities in Institute of Multimedia ICT, Slovak University of Technology	639
Nemlineáris folyamatok szabályzása méréssel felvett, tenzorszorzat alapú közelítő rendszermodell segítségével.....	641
A villamosmérnök hallgatók szakmai identitásának vizsgálata az Óbudai Egyetem Kandó Kálmán Villamosmérnöki Karán.....	643
A state of the art power modulok elektromos komponensei	644
Gépbiztonság jövője, az ipari automatizálás és kiberbiztonság kapcsolata	645
Measurement applications in the validation of CLAAS products	646
Hidrogén szerepe az energiabiztonság növelésében a megújuló energiaforrások integrációja mellett	647
A new type of microscopic ellipsometer utilizing point-like light source	648
HCHiP – Új, innovatív lehetőség Magyarországon	649

Petri-hálón alapuló modell elektromos járművek töltésének szimulációjára	650
Árammérés mezőorientált állandómágneses szinkronmotor-hajtásokban	652
Fények a vályúnál - A mesterséges megvilágítás szerepe és hatása a sertésenyésztésben	653
Introduction into the Dynamic Normalising Method for Sinusoidal Signals	655

Előszó

A Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar hagyományaként 2025. évben negyvenegyedik alkalommal megtartásra került az „XLI Kandó Konferencia”. A Konferenciát az Magyar Tudomány Ünnepe keretein belül szerveztük.

A Konferencia célja a magyar szaknyelv ápolásán túl az ipari, kutatási kapcsolataink erősítése, az együttműködések elmélyítése.

A Konferenciát a Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar két jelentős ipari kutató partnere, az ERICSSON és a BOSCH támogatta.

A Konferencián közel 100 szakmai előadás hangzott el, mely előadásokhoz tartozóan 50 tudományos cikket jelen Kiadvány tartalmaz. A Kiadvány végén a további előadások absztraktjai kaptak helyet. A Kiadványban szereplő tudományos cikkek a Konferencia Szakmai Bizottsága elfogadta, azokat megjelenésre alkalmasnak nyilvánította.

A Kandó Konferencia célja a Magyar szaknyelv gondozása. Ugyanakkor a külföldi kapcsolataink révén elindult a Konferencia nemzetköziesítése, mely kapcsán angol nyelvű előadások is megtartásra kerültek így jelen Kiadványban angol nyelvű cikkek és absztraktok is megjelennek.

Őszintén reméljük, hogy rendezvényeink elősegítik Kollégáink tudományos előmenetelét és kutatómunkáját, valamint hozzájárul az Ipari és nemzetközi kapcsolataink erősítéséhez.

szerkesztő:

Dr.habil. Wühlr Tibor
KSC2025 konferencia elnök

üres oldal

Enneagram personality revealing system in the educational systems

Rákóczi Barbara Mónika

¹ Óbuda University, Kandó Kálmán Faculty of Electrical Engineering, Institute of Automation and Energy Systems. Budapest, Hungary, rakoczi.barbara@uni-obuda.hu

Abstract : The Enneagram is a system based on personality types, the secret of which is that while most personality typologies merely describe and characterize different types, here we receive concrete guidance towards the desired direction of change. It not only characterizes 9 personality types but also sheds light on the deep motivations behind typical behaviors, revealing biographical connections, life, and behavioral patterns. In addition to formulating driving forces, aspirations, and external and internal character traits, it also shows type-dependent cooperation guidelines and problem-solving strategies. Its main positive aspect is that it helps to uncover the possible attitude traps of individual characters and highlights the direction of development. The method aids in achieving personality management through conscious attention against the instinctive reactions of long-established personality patterns. I incorporated this into my teaching methodology, specifically broken down for individuals with autism. [2]

Keywords: enneagramm, autism, education

1. The Nine Types of the Enneagram

At the heart of the Enneagram lie nine basic personality types, each centered around a particular motivation, fear, and desire. While everyone has aspects of all nine types, one dominant type tends to shape our overall behavior and worldview.

1. The Reformer (Perfectionist)

Motivated by the desire to be good, right, and ethical. Strives to improve themselves and the world around them. Their fear is being wrong or corrupt. Strength: integrity. Weakness: criticism and rigidity.

2. The Helper (Giver)

Driven by the need to be loved and appreciated. Warm and empathetic, yet sometimes overly focused on others' approval. Fear: being unwanted or unloved. Strength: selflessness. Weakness: manipulation or excessive people-pleasing.

3. The Achiever (Performer)

Motivated by success, recognition, and efficiency. Wants to excel and be admired. Fear: failure or worthlessness. Strength: ambition and focus. Weakness: overidentification with image or roles.

4. The Individualist (Romantic)

Deeply feeling and creative, constantly seeking authenticity. Fear: having no personal significance or identity. Strength: emotional honesty. Weakness: melancholy and self-absorption.

5. The Investigator (Observer)

Seeks understanding and knowledge. Analytical, curious, and independent.

Fear: helplessness or incompetence. Strength: wisdom and insight. Weakness: detachment and emotional withdrawal.

6. The Loyalist (Security Seeker)

Motivated by the need for safety and stability. Responsible and loyal, but often anxious and doubtful. Fear: being without support or guidance. Strength: reliability. Weakness: suspicion and indecision.

7. The Enthusiast (Adventurer)

Optimistic, spontaneous, and freedom-loving. Seeks excitement and avoids pain or restriction. Fear: deprivation and boredom. Strength: joy and versatility. Weakness: impulsiveness and avoidance of responsibility.

8. The Challenger (Leader)

Strong, assertive, and protective. Strives to be in control and avoid vulnerability. Fear: being dominated or harmed. Strength: courage and decisiveness. Weakness: aggression and excessive control.

9. The Peacemaker (Mediator)

Calm, accepting, and easygoing. Desires harmony and avoids conflict. Fear: disconnection or loss of inner peace. Strength: patience and empathy. Weakness: passivity and self-forgetfulness. [3]

2. Wings, Arrows, and Growth Dynamics

The Enneagram is not a rigid system. Each type has two wings—the adjacent types that influence it. For example, a Type 2 can be a “2w1” (a Helper with perfectionist traits) or a “2w3” (a Helper with achiever traits).

Additionally, every type has stress and growth directions. Under stress, a person may take on the negative traits of another type, while in growth, they adopt the positive qualities of a different one. For instance, Type 1 moves toward Type 4 under stress and toward Type 7 in growth.

In the education it is the same in little laboratory groups or in big lectures. [4]

3. Enneagramm in education

University teaching methods combine traditional and modern approaches to enhance learning and critical thinking. Lectures remain common for delivering core knowledge, while seminars and workshops encourage discussion and collaboration. Problem-based and project-based learning foster practical skills, and digital tools such as online platforms and simulations expand accessibility. Effective higher education emphasizes active participation, research engagement, and the development of independent, lifelong learners. It can we examine with enneagram system.

4. Practical Applications of the Enneagram

The goal of the Enneagram is not labeling but **self-awareness and transformation**. It helps us see the hidden motivations behind our behavior, allowing us to make more conscious choices and build healthier relationships.

It is especially useful in the following areas:

- **Psychology and therapy:** enhances self-understanding and emotional healing.
- **Relationships:** fosters empathy, communication, and conflict resolution.
- **Work and leadership:** improves teamwork and organizational awareness.

- **Spiritual growth:** reveals how our ego patterns block inner peace and love.
[5]

5. Criticism and Cautions

While the Enneagram can be a profound tool for self-discovery, it is not a scientific diagnostic instrument. It is better understood as a symbolic map that guides self-awareness. Over-identifying with one's type can become limiting—true growth means learning to transcend one's type rather than being trapped within it.

Summary

The Enneagram is an ancient system of self-knowledge and personality typology that aims to reveal the deeper motivations, fears, and behavior patterns that shape human life. Its name derives from the Greek words *ennea* (nine) and *gramma* (figure, symbol), referring to the ninepointed geometric symbol that represents the model. The core idea is that every person belongs to one dominant personality type that influences how we perceive the world, how we react to it, and how we strive to maintain our inner balance.

Although the Enneagram has roots in mystical traditions (such as Sufi teachings), its modern form was developed in the mid-20th century through the work of thinkers like Oscar Ichazo and Claudio Naranjo. Since then, the system has become widespread around the world and is used in psychology, spirituality, education, and organizational development. [1]

6. Conclusion

The Enneagram is a rich and insightful system that not only shows what we are like but also why we are that way. It reveals the deep motivations behind our actions, helps us understand others, and offers a path toward greater freedom and authenticity.

All nine types ultimately point toward one shared purpose: to rediscover our true center and connect with the world from a place of honesty, compassion, and wholeness.

7. References

- [1] <https://www.integrative9.com/enneagram> Introducing the Enneagram as a personality type model (view date: 04.10.2025.)
- [2]<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/jclp.23097?msockid=0c3fee4277f4666f18f9fb81762d6727> The Enneagram: A systematic review of the literature and directions for future research (view date: 04.10.2025.)
- <https://enneagrammonthly.com/category/comparative-systems-and-typology/> Comparative Systems (view date: 04.10.2025.)
- <https://enneagrammonthly.com/category/comparative-systems-and-typology/> Process Enneagramm (view date: 04.10.2025.)
- <https://gurdjiefflegacy.org/70links/enneagram.htm> The teching for our time (view date: 04.10.2025.)

Kohonen's self-organizing maps in education

Kohonen önszerveződő térképei az oktatásban

Rákóczi Barbara Mónika

¹ Óbuda University, Kandó Kálmán Faculty of Electrical Engineering, Institute of Automation and Energy Systems. Budapest, Hungary, rakoczi.barbara@uni-obuda.hu

Abstract: A Kohonen network, also known as a Kohonen action map, is a type of artificial neural network that falls into the category of self-organizing networks. A Kohonen network was developed by Teuvo Kohonen in the 1980s and is one of the most widely used types of self-organizing networks. The goal of a Kohonen network is to group data into a two-dimensional map based on their similarity. In a Kohonen network, data is provided as an input layer, and the output layer forms a two-dimensional grid in which each neuron belongs to a cell. The algorithm feeds data into the network through the input layer and assigns the data to the nearest neuron based on its characteristics. The output neurons then change their activity due to their influence on nearby neurons, causing the network to self-organize and group similar data into the same group. Kohonen networks are widely used for pattern classification, segmentation, and dimensionality reduction, as well as for data visualization. Kohonen networks use unsupervised learning, which allows the network to work efficiently on data without prior knowledge of the output results. This can also be used in education. [2]

Keywords: Kohonen, network, education

1. Kohonen's Self-Organizing Maps

The Kohonen network, also known as a Self-Organizing Map (SOM), is a type of unsupervised neural network designed to discover hidden structures and patterns in data without using predefined labels. It is particularly effective for visualizing and clustering complex, high-dimensional information.

A Kohonen network consists of a two-dimensional grid of neurons, each associated with a weight vector of the same dimension as the input data. When an input vector is presented, all neurons calculate their distance from it, and the neuron with the smallest distance becomes the Best Matching Unit (BMU). This neuron, along with its neighbors on the grid, updates its weights to become more

similar to the input. Over many iterations, the map gradually organizes itself so that similar inputs activate neurons close to each other — preserving the topological relationships of the data.

The learning process is competitive and cooperative at the same time: neurons compete to represent the input, but neighboring neurons cooperate during weight updates. As training progresses, both the learning rate and the neighborhood radius decrease, allowing the map to form a fine-grained, stable representation of the input space.

One of the key advantages of the Kohonen network is its ability to reduce dimensionality while maintaining the original data structure. It converts complex, multidimensional data into a two-dimensional visual map, where clusters and similarities become intuitively visible.

This makes the Self-Organizing Map a valuable tool in fields like pattern recognition, data mining, market analysis, and bioinformatics — bridging the gap between numerical data and intuitive visual understanding. The learning process involves three main steps:

1. **Competition:** When an input vector is presented, all neurons compute their distance from it, and the neuron with the smallest distance is selected as the **Best Matching Unit (BMU)**.
2. **Cooperation:** The BMU's neighboring neurons on the grid are also activated, forming a **neighborhood**.
3. **Adaptation:** The BMU and its neighbors adjust their weight vectors to move closer to the input vector. Over time, the neighborhood radius and learning rate decrease, leading to a stable, self-organized map.

One of the major strengths of the SOM is its ability to preserve the structure of the input data in a way that is easily interpretable. It can transform complex datasets—such as images, sensor readings, or gene expression data—into two-dimensional visual maps where clusters, patterns, and correlations become visible. This makes SOMs highly valuable in exploratory data analysis, pattern recognition, and data mining.

Kohonen maps are widely used in various fields, including finance (for portfolio analysis), biomedicine (for identifying genetic patterns), marketing (for customer segmentation), and engineering (for fault detection and process monitoring). Their strength lies in their intuitive visualization capability, allowing humans to grasp relationships that might otherwise remain hidden in raw, high-dimensional data.

In summary, Kohonen's Self-Organizing Maps are a remarkable example of biologically inspired machine learning. They demonstrate how simple, local adaptation rules can produce global organization, offering both practical analytical

power and deep insights into how learning and perception might occur in the human brain. [3]

2. Applications of Kohonen's Self-Organizing Maps

Kohonen's Self-Organizing Map (SOM) is widely used across many scientific, industrial, and commercial fields because it helps people visualize, analyze, and cluster complex data in an intuitive way. Its ability to reveal patterns without requiring labeled data makes it a powerful tool in both research and real-world applications.

Data Visualization and Exploration:

SOMs are often used to transform large, high-dimensional datasets into easy-to-interpret two-dimensional maps. This helps researchers discover relationships, clusters, and trends that might not be visible in raw data.

Pattern Recognition and Classification:

In areas like image and speech recognition, SOMs can identify similarities between patterns. For example, they can group handwritten digits, facial features, or voice samples based on their characteristics.

Market and Customer Analysis:

Companies use SOMs in marketing and customer segmentation to identify groups of consumers with similar purchasing behavior or preferences. This supports targeted advertising, product development, and personalized recommendations.

Bioinformatics and Medicine:

In genetics and medical diagnostics, SOMs help analyze gene expression data or classify diseases based on complex biological markers. They are also used to detect patterns in medical imaging or patient monitoring data.

Finance and Economics:

SOMs are applied to credit risk analysis, stock market data, and portfolio management. They can reveal hidden correlations among financial instruments or help detect anomalies in transactions.

Engineering and Process Monitoring:

In industrial systems, SOMs assist in fault detection, quality control, and sensor data analysis. By mapping normal and abnormal conditions, engineers can identify irregular behavior early.

Robotics and Control Systems:

SOMs help robots and autonomous systems learn to interpret sensory inputs and navigate environments. They support adaptive control and decision-making by organizing sensory data efficiently.

Text and Document Analysis:

In natural language processing, SOMs are used to cluster documents by topic or meaning, helping organize large collections of text or improve search and recommendation systems. [4]

I use it in education.

3. Summary

Kohonen's Self-Organizing Map (SOM) is a type of unsupervised neural network developed by Finnish scientist Teuvo Kohonen in the 1980s. It is a powerful tool for data visualization, clustering, and dimensionality reduction, especially useful when dealing with high-dimensional datasets. Unlike traditional neural networks that require labeled data, the SOM learns to organize information based purely on similarities between input patterns.

The central idea of a SOM is to map complex, multidimensional input data onto a two-dimensional grid of neurons, preserving the topological relationships within the data. Each neuron in the grid is associated with a weight vector that has the same dimensionality as the input data. During the learning process, the SOM adjusts these weights so that similar inputs activate neurons that are close to each other on the grid. As a result, the map forms an organized representation of the input space. [1]

4. Conclusion

Globally, Kohonen's Self-Organizing Maps serve as a bridge between complex numerical data and human intuition. They are used wherever large datasets need to

be explored, simplified, and understood — from scientific research to business intelligence, from bioinformatics to artificial intelligence.

5. References

- [1] <http://www.ai-junkie.com/ann/som/som1.html> Kohonen's Self Organizing Feature Maps (view date: 04.10.2025.)
- [2] <https://www.geeksforgeeks.org/python/self-organising-maps-kohonen-maps/> Self Organizing Maps - Kohonen Maps (view date: 04.10.2025.)
- [3] <https://www.learnartificialneuralnetworks.com/kohonen.html> Kohonen Self Organizing Maps (view date: 04.10.2025.)
- [4] <https://medium.com/codex/mapping-hidden-patterns-a-practical-guide-to-kohonen-self-organizing-maps-for-data-clustering-and-0856316c0c9e> Mapping Hidden Patterns: A Practical Guide to Kohonen Self-Organizing Maps for Data Clustering and Visualizatio (view date: 04.10.2025.)

Quantum Digitization of Electromagnetic Field States: A Computational Tool for Investigating Encoding-Dependent Quantum Information Measures

István Németh

Óbuda University, Kandó Kálmán Faculty of Electrical Engineering,
17 Tavaszmező Street, Budapest 1084
nemeth.istvan@kvk.uni-obuda.hu

Abstract: We present a comprehensive computational tool for investigating the quantum digitization problem: how to represent continuous electromagnetic field states as discrete qubit registers. The encoding of quantum field states into finite qubit systems is a fundamental challenge in quantum information theory, with significant implications for quantum computing, communication, and metrology. We introduce two Mathematica-based analysis functions, `QubitInfoPanel[]` and `QubitInfoPanelGray[]`, which accept arbitrary density matrices describing quantized electromagnetic fields and compute a comprehensive suite of quantum information measures including entanglement, mutual information, and entropy. These tools enable systematic investigation of how encoding scheme choices (Binary vs Gray code) and measurement basis selections (Fock vs Phase) affect the observed quantum correlations. Our framework provides researchers with a validated platform to explore representation-dependent quantum properties in field quantization schemes.

Keywords: quantum digitization; qubit encoding; quantum entanglement measures; electromagnetic field quantization; Gray code representation

1 Introduction

The quantization of electromagnetic fields lies at the heart of quantum optics and quantum electrodynamics [11,12]. While the continuous-variable description of field states in the Fock space provides a complete mathematical framework, practical implementations of quantum information processing require discrete, finite-dimensional representations [1]. The process of encoding continuous field states into discrete qubit registers presents fundamental theoretical questions that have direct implications for quantum computing architectures, quantum communication protocols, and quantum measurement strategies.

This encoding process is far from trivial. The choice of how to map photon number states to computational basis states of qubits can fundamentally alter the quantum information content that is accessible through measurements. Similarly, the selection of which measurement basis to employ—whether the Fock basis that directly corresponds to photon numbers, or complementary bases such as the phase basis—can reveal different aspects of the quantum correlations present in the system.

Despite the fundamental importance of these questions, there has been a lack of comprehensive computational tools that enable systematic investigation of encoding-dependent quantum properties. Existing quantum information analysis packages typically assume a fixed computational basis and do not provide flexible frameworks for comparing different digitization schemes or exploring multiple measurement bases.

In this work, we present two complementary analysis tools, `QubitInfoPanel[]` and `QubitInfoPanelGray[]`, implemented in Wolfram Mathematica. These functions accept as input an arbitrary density matrix describing a quantized electromagnetic field state and compute a comprehensive suite of quantum information measures, including:

- Bipartite entanglement quantified through negativity measures
- Tripartite genuine entanglement via three-tangle calculations
- Mutual information matrices revealing qubit-qubit correlations
- Von Neumann and linear entropies characterizing quantum uncertainty

The two functions differ in their encoding schemes: `QubitInfoPanel[]` implements standard binary encoding, while `QubitInfoPanelGray[]` employs Gray code encoding. This parallel implementation enables direct investigation of the fundamental question: does the choice of computational encoding affect measured quantum properties? Both tools support analysis in either Fock or phase measurement bases, allowing researchers to explore basis-dependent quantum correlations.

This paper provides a comprehensive description of the theoretical framework, computational implementation, and validation methodology for these tools. Our goal is to provide the research community with a robust, validated platform for investigating the rich landscape of representation-dependent quantum information in electromagnetic field systems.

2 The Quantum Digitization Problem

2.1 From Continuous to Discrete: The Fundamental Challenge

The quantum state of an electromagnetic field mode is naturally described in an infinite-dimensional Fock space, where the basis states $|n\rangle$ represent well-defined photon numbers $n = 0, 1, 2, \dots$. A general pure state can be written as a superposition:

$$|\psi\rangle = \sum c_n |n\rangle$$

where the probability amplitudes c_n are complex numbers satisfying $\sum |c_n|^2 = 1$. More generally, mixed states are described by density matrices ρ acting on this infinite-dimensional space.

For practical quantum information processing, we must work with finite-dimensional quantum systems. The most fundamental such system is the qubit, a two-level quantum system spanning a two-dimensional Hilbert space. To interface continuous field states with discrete quantum processors, we must therefore devise schemes to encode photon number information into registers of qubits.

Consider a qubit register of N qubits. This system spans a 2^N -dimensional Hilbert space with computational basis states that we can label by N -bit binary strings. The central question is: how should we map photon number states $|n\rangle$ to these computational basis states?

2.2 The Non-Triviality of Encoding Choice

One might initially assume that the choice of encoding is merely a matter of convention—a relabeling of states that cannot affect physical properties. However, this intuition is incorrect for several fundamental reasons:

1. Subsystem Structure: Different encodings define different subsystem decompositions of the total Hilbert space. When we identify individual qubits as subsystems, the entanglement between these subsystems depends critically on how photon numbers are distributed across the qubit register. For instance, photon numbers n and $n+1$ that differ by one photon might be encoded into qubit states that differ in one bit position (as in Gray code) or in multiple bit positions (as in binary). This affects which qubits become entangled.

2. Measurement Accessibility: When we measure individual qubits, the outcomes correspond to projections onto the computational basis of each qubit. Different encodings make different properties of the photon number distribution directly accessible through such measurements. The mutual information between

qubits, which quantifies the correlations accessible through joint measurements, therefore depends on the encoding scheme.

3. Partial Trace Operations: Many quantum information measures, including entanglement negativity and mutual information, require computing reduced density matrices by tracing over subsystems. The partial trace operation depends explicitly on the subsystem structure, which is defined by the encoding choice. Different encodings therefore yield different reduced density matrices and different values for these information measures.

These considerations demonstrate that encoding choice is not a mere convention but a substantive physical choice that determines how quantum information is distributed across the qubit register and what correlations are accessible through measurements. A comprehensive tool for quantum field analysis must therefore support multiple encoding schemes and enable systematic comparison of their properties.

3 Encoding Schemes

3.1 Binary Encoding

The most straightforward encoding scheme is standard binary representation. In this scheme, a photon number state $|n\rangle$ is mapped to the computational basis state corresponding to the binary representation of the integer n .

For an N -qubit register, we can represent photon numbers from 0 to 2^N-1 . The mapping is defined by expressing n in binary:

$$n = \sum b_k 2^k, \text{ where } b_k \in \{0,1\}$$

The photon state $|n\rangle$ is then mapped to the qubit state $|b_{(n-1)}...b_1b_0\rangle$, where b_k represents the state of the k -th qubit.

Example: For a 3-qubit system ($N=3$):

- $|5\rangle \rightarrow |101\rangle$ (since $5 = 1 \times 4 + 0 \times 2 + 1 \times 1$)
- $|3\rangle \rightarrow |011\rangle$ (since $3 = 0 \times 4 + 1 \times 2 + 1 \times 1$)

Binary encoding has the advantage of being familiar and providing a direct correspondence between arithmetic operations on photon numbers and Boolean operations on qubit states. However, consecutive photon numbers can differ in multiple bit positions, potentially creating entanglement patterns that reflect the encoding more than the underlying physics.

3.2 Gray Code Encoding

Gray code provides an alternative binary encoding with a distinctive property: consecutive integers differ in exactly one bit position [10]. This single-bit-change property makes Gray code a natural candidate for investigating whether encoding choice affects quantum information measures.

The Gray code sequence can be generated recursively or through the formula:

$$G(n) = n \text{ XOR } (n \gg 1)$$

where $\gg$ denotes right bit-shift and XOR is the exclusive-or operation.

Table 1

Example: For a 3-qubit system, the Gray code sequence is:

Photon n	Binary	Gray Code	Bits Changed
0	000	000	-
1	001	001	1
2	010	011	1
3	011	010	1
4	100	110	1
5	101	111	1
6	110	101	1
7	111	100	1

Note that in Gray code, moving from photon number n to $n+1$ always changes exactly one bit, whereas in binary encoding, the number of bit changes can vary (e.g., going from 3 to 4 in binary requires changing three bits: $011 \rightarrow 100$).

The single-bit-change property of Gray code makes it an important test case for investigating encoding dependence. By comparing quantum information measures calculated with binary versus Gray encoding, researchers can determine whether and how the encoding scheme affects observed quantum properties. Any differences observed would indicate that the subsystem structure defined by the encoding plays a genuine physical role in determining measured correlations.

4 Measurement Bases

Beyond the choice of encoding scheme, the selection of measurement basis provides another degree of freedom in quantum field analysis. Our tools support computation in two complementary bases: the Fock basis and the phase basis.

4.1 Fock Basis

The Fock basis $\{|n\rangle\}$ is the natural eigenbasis of the photon number operator $\hat{n} = a^\dagger a$, where $a^\dagger$ and a are the creation and annihilation operators [11,12]. In this basis, each basis state $|n\rangle$ represents a definite number of photons in the field mode.

For most cavity quantum electrodynamics systems, the Fock basis is the most natural choice because:

- The system Hamiltonian is typically diagonal or nearly diagonal in the Fock basis
- Photon number measurements directly project onto Fock states
- Standard quantum optical processes preserve or minimally mix Fock states

When working in the Fock basis, the density matrix elements $\rho_{nm} = \langle n|\rho|m\rangle$ directly represent the quantum coherences between different photon number states. The encoding process then maps these matrix elements to the corresponding qubit basis states according to the chosen encoding scheme.

4.2 Phase Basis

The phase basis provides a complementary representation of the electromagnetic field state. In this basis, states are labeled by definite phase values θ , forming a continuous basis conjugate to the photon number basis.

For practical computation with discrete systems, we work with a discretized phase basis. For an N-qubit system encoding up to 2^N photon states, we define 2^N phase basis states:

$$|\theta_k\rangle = (1/\sqrt{2^N}) \sum_n \exp(i n \theta_k) |n\rangle$$

where $\theta_k = 2\pi k/2^N$ for $k = 0, 1, \dots, 2^N-1$. This represents a discrete Fourier transform relationship between the Fock and phase bases.

The phase basis is particularly important because:

- It reveals phase coherences that may not be apparent in the Fock representation
- It provides information complementary to photon number measurements
- Different physical processes may be better characterized in phase space

To work in the phase basis, we transform the density matrix from Fock to phase representation before applying the qubit encoding. This transformation is accomplished through a discrete Fourier transform of the density matrix.

4.3 Basis-Dependent Quantum Information

An important conceptual point is that while the global quantum state $|\psi\rangle$ or ρ is basis-independent, the quantum correlations between subsystems can be basis-dependent. When we partition the system into qubit subsystems and measure properties like entanglement or mutual information, we are asking questions about correlations accessible through measurements on those specific subsystems. Since the subsystem structure depends on both the encoding scheme and the choice of basis, different basis selections can reveal different correlation patterns. Our tools enable systematic exploration of these basis-dependent quantum properties.

5 Calculated Quantities: Information Theory Measures

Our analysis tools compute several standard information-theoretic quantities that characterize the quantum state and its correlation structure. These measures provide complementary perspectives on the information content and uncertainty in the quantum field state.

5.1 Von Neumann Entropy

The von Neumann entropy is the quantum generalization of the Shannon entropy and provides a measure of the uncertainty or mixedness of a quantum state [1,2]. For a density matrix ρ with eigenvalues $\{\lambda_i\}$, it is defined as:

$$S(\rho) = -\text{Tr}(\rho \log_2 \rho) = -\sum_i \lambda_i \log_2 \lambda_i$$

The von Neumann entropy satisfies $S(\rho) \geq 0$, with equality if and only if ρ represents a pure state. For a maximally mixed state of dimension d , $S(\rho) = \log_2 d$. The entropy provides a measure of the number of qubits worth of uncertainty in the state.

Our tools compute both the total von Neumann entropy of the full qubit register and the entropies of individual qubits (obtained from their reduced density matrices). These quantities are useful for:

- Quantifying the total uncertainty in the quantum state
- Identifying which qubits carry the most information about the photon distribution
- Detecting transitions between different quantum phases or regimes

5.2 Linear Entropy

The linear entropy provides an alternative measure of state purity that is computationally simpler than the von Neumann entropy. It is defined as:

$$S_l(\rho) = 1 - \text{Tr}(\rho^2)$$

The linear entropy ranges from 0 for pure states to $(d-1)/d$ for maximally mixed states of dimension d . It relates to the purity $P = \text{Tr}(\rho^2)$ through $S_l = 1 - P$.

The linear entropy has computational advantages because it only requires computing ρ^2 , avoiding the eigenvalue decomposition needed for von Neumann entropy. It provides a useful first approximation to state mixedness and is particularly efficient for large systems.

5.3 Mutual Information

The mutual information quantifies the total correlations (both classical and quantum) between two subsystems [1,3]. For subsystems A and B described by reduced density matrices ρ_a and ρ_b , the mutual information is:

$$I(A:B) = S(\rho_a) + S(\rho_b) - S(\rho_{ab})$$

where ρ_{ab} is the joint density matrix of the combined system. The mutual information is always non-negative and vanishes if and only if the subsystems are uncorrelated ($\rho_{ab} = \rho_a \otimes \rho_b$).

Our tools compute the complete mutual information matrix $I(i;j)$ for all pairs of qubits i and j . This $N \times N$ matrix (for N qubits) provides a comprehensive map of the correlation structure:

- High mutual information indicates strong correlations between qubits
- The pattern of mutual information reveals which qubits are most strongly coupled
- Changes in mutual information patterns can signal quantum phase transitions

The mutual information matrix is particularly useful for understanding how the encoding scheme distributes correlations across the qubit register. Different encodings can produce dramatically different mutual information patterns for the same underlying field state.

6. Calculated Quantities: Entanglement Measures

Beyond information-theoretic measures, our tools compute several quantities that specifically characterize quantum entanglement—the quintessentially quantum correlation that distinguishes quantum information from classical information theory.

6.1 Bipartite Entanglement: Negativity

Entanglement between two subsystems (bipartite entanglement) is quantified through the negativity measure, which is based on the partial transpose criterion [4,5,6]. For a bipartite system AB with density matrix ρ_{ab} , we define the partial transpose with respect to subsystem B:

$$\langle i, j | \rho^{TB} | k, l \rangle = \langle i, l | \rho | k, j \rangle$$

The Peres-Horodecki criterion states that ρ_{ab} is separable (non-entangled) if and only if ρ^{TB} has no negative eigenvalues. The negativity quantifies the violation of this criterion:

$$N(\rho_{ab}) = (||\rho^{TB}||_1 - 1)/2$$

where $||\cdot||_1$ denotes the trace norm (sum of absolute values of eigenvalues). The negativity vanishes for separable states and increases with entanglement strength.

Our tools compute negativity for all pairs of qubits, producing an $N \times N$ negativity matrix. The computational procedure involves:

- Computing the reduced density matrix ρ_{ij} for each qubit pair (i,j)
- Performing the partial transpose operation
- Computing eigenvalues of the partially transposed matrix
- Calculating the trace norm and extracting the negativity

The partial trace operation required for this calculation explicitly depends on the subsystem structure, and therefore on the encoding scheme. This makes the negativity matrix particularly sensitive to encoding choice.

6.2 Tripartite Entanglement: Three-Tangle

While bipartite entanglement characterizes correlations between pairs of qubits, genuine multipartite entanglement reveals richer correlation structures. For three-qubit systems, the three-tangle provides a measure of genuine tripartite entanglement that cannot be reduced to pairwise correlations [7,13].

The three-tangle $\tau(A:B:C)$ for three qubits A, B, and C is defined through the Coffman-Kundu-Wootters monogamy relation [7]:

$$C^2(A:BC) = C^2(A:B) + C^2(A:C) + \tau(A:B:C)$$

where $C(A:B)$ denotes the concurrence between qubits A and B. The three-tangle quantifies the entanglement that is genuinely tripartite—it cannot be accounted for by any decomposition into bipartite entanglements.

For systems with $N > 3$ qubits, our tools compute the three-tangle for all triplets of qubits, providing a complete characterization of tripartite entanglement structure. This reveals:

- Which triplets of qubits exhibit genuine three-way entanglement
- Whether the system contains GHZ-type correlations
- How multipartite entanglement is distributed across the register

The three-tangle is particularly valuable for investigating encoding dependence because genuine multipartite entanglement is even more sensitive to subsystem structure than bipartite entanglement.

6.3 Computational Challenges and Numerical Methods

Computing entanglement measures for qubit registers encoded from electromagnetic field states presents several computational challenges:

1. Matrix Dimensionality: An N -qubit system has a $2^N \times 2^N$ density matrix. For typical systems ($N = 6-10$), this ranges from 64 to 1024 dimensions, requiring careful numerical handling.

2. Phase Basis Stability: The discrete Fourier transform required for phase basis representation can introduce numerical artifacts if not handled carefully. Our implementation uses stabilization techniques to maintain positivity and trace normalization of the density matrix.

3. Partial Transpose Eigenvalues: Computing negativity requires eigenvalue decomposition of the partially transposed matrix. Near-zero eigenvalues must be handled carefully to avoid spurious entanglement detection.

Our implementation addresses these challenges through adaptive numerical precision, careful matrix conditioning, and validation against known quantum states (discussed in Section 8).

7 Tool Implementation

7.1 Architecture Overview

Both `QubitInfoPanel[]` and `QubitInfoPanelGray[]` follow a common computational architecture with three main stages:

Stage 1: Input Processing and Basis Transformation

- Accept density matrix ρ in Fock basis
- If phase basis analysis requested, apply discrete Fourier transform
- Stabilize matrix to ensure proper normalization and positivity

Stage 2: Qubit Encoding and Subsystem Decomposition

- Determine number of qubits N needed to represent the system
- Apply encoding map (Binary or Gray) to reorder density matrix
- Establish subsystem structure for qubit partitioning

Stage 3: Quantum Information Calculation

- Compute reduced density matrices for all subsystems
- Calculate entropies, mutual information, and entanglement measures
- Format and return results

7.2 Key Functions and Modules

The implementation consists of several core functions:

InitialStateGeneration[]: Creates initial quantum states for testing purposes. Generates standard states including computational basis states, Bell states, GHZ states, and W states.

ReduceToSubset[]: Performs partial trace operations to compute reduced density matrices. Takes a density matrix and a specification of which subsystems to trace over, returning the reduced state of the remaining subsystems.

Negativity calculation modules: Compute partial transpose, diagonalize, and extract negativity measure. Includes specialized handling for numerical stability near zero eigenvalues.

Mutual Information modules: Calculate entropies of subsystems and joint systems, computing mutual information via $S(A) + S(B) - S(AB)$.

Three-Tangle modules: Compute concurrences and apply the Coffman-Kundu-Wootters formula to extract genuine tripartite entanglement.

7.3 Input Specifications

Input Format:

- Density matrix ρ as a complex-valued matrix (dimensions must be a power of 2)
- Optional basis specification (Fock or Phase)
- Optional numerical precision parameters

7.4 Output Formats

Our tools provide output in two complementary formats designed for different use cases: machine-readable CSV files for automated analysis and human-readable PDF dashboards for visual inspection.

CSV Export for Automated Analysis:

All calculated quantum information measures are automatically exported to CSV (Comma-Separated Values) files. This enables:

- Integration into automated analysis pipelines
- Building large-scale measurement databases through loop execution
- Statistical analysis across parameter sweeps
- Import into external analysis tools (Python, R, MATLAB, etc.)

The CSV format includes all computed quantities:

- Total von Neumann entropy of the system
- Vector of individual qubit entropies
- Linear entropy and purity
- Complete $N \times N$ mutual information matrix
- Complete $N \times N$ negativity matrix for bipartite entanglement

- Three-tangle values for all qubit triplets
- Metadata including encoding type, basis, timestamp, and computation time

This machine-readable format is particularly valuable when conducting parameter studies that require hundreds or thousands of function evaluations. The functions can be called in loops to systematically explore the parameter space, with all results automatically archived in CSV format for subsequent analysis.

PDF Dashboard Visualization:

For human interpretation and quality control, the tools generate comprehensive single-page PDF dashboards that present all quantum information measures in a carefully organized visual layout. These dashboards are designed to provide information at a glance, enabling rapid assessment of:

- Overall quantum state structure through density matrix visualizations
- Qubit-by-qubit entropy and entanglement patterns
- Phase space representations and photon number distributions
- Correlation matrices showing qubit-qubit relationships
- Key statistical measures and quantum parameters

The dashboard layout includes multiple panels showing different aspects of the quantum state simultaneously. Density matrices are displayed in both standard matrix form and as graphical representations with arrows indicating phase relationships. Reduced density matrices for individual qubits are shown alongside their entropy values, providing immediate insight into which qubits carry the most information.

Figures 1 and 2 show example dashboards for the W state, an entangled three-qubit state given by:

$$|W\rangle = (1/\sqrt{3})(|001\rangle + |010\rangle + |100\rangle)$$

This state exhibits symmetric pairwise entanglement but zero three-tangle, making it an ideal test case. Figure 1 shows the analysis with Binary encoding, while Figure 2 shows Gray code encoding of the identical quantum state. Comparing these dashboards reveals how encoding choice affects the distribution of quantum correlations across the qubit register while preserving global properties.

The combination of CSV and PDF outputs provides optimal workflow support: CSV files enable systematic large-scale studies and automated analysis, while PDF dashboards facilitate quality control, debugging, and physical interpretation of results.

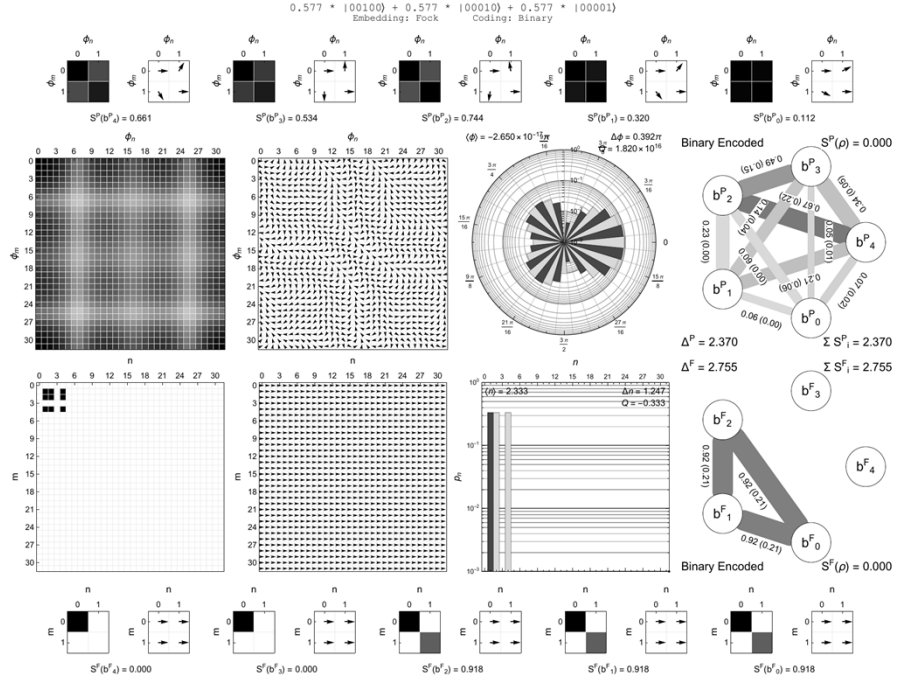


Figure 1

Dashboard for W state $|W\rangle = (1/\sqrt{3})(|001\rangle + |010\rangle + |100\rangle)$ with Binary encoding in Fock basis. The visualization shows density matrix representations, reduced density matrices for each qubit with their entropies, photon number distribution, phase space representation, mutual information, and negativity patterns. Note the symmetric pairwise entanglement pattern characteristic of the W state.

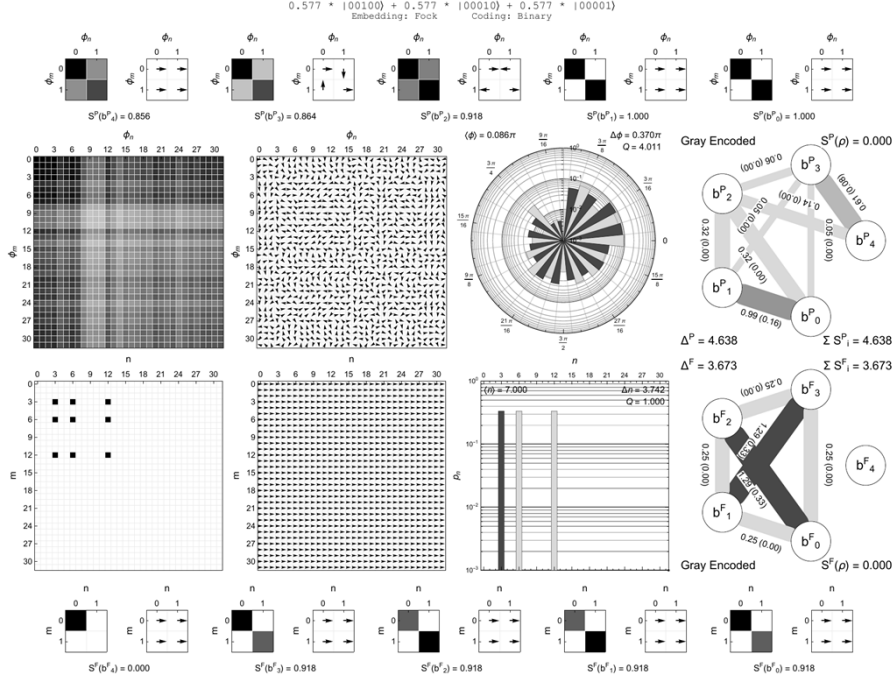


Figure 2

Dashboard for the same W state with Gray code encoding in Fock basis. Comparing with Figure 1 reveals how encoding choice redistributes quantum correlations across the qubit register. While global properties (total entropy, state purity) remain invariant, the subsystem entanglement patterns differ significantly, demonstrating the encoding-dependent nature of qubit-qubit correlations.

8 Validation Examples

To ensure correctness of our computational tools, we perform extensive validation using quantum states with known entanglement and information-theoretic properties. This section describes our validation methodology and results.

8.1 Standard Test States

We validate against several classes of standard quantum states:

1. Product States:

- Computational basis states $|000\rangle$, $|001\rangle$, $|010\rangle$, etc.

- Expected: Zero entanglement, zero mutual information
- Result: All entanglement measures correctly return zero

2. Bell States:

- Maximally entangled two-qubit states: $|\Phi^+\rangle = (|00\rangle + |11\rangle)/\sqrt{2}$
- Expected: Negativity = 0.5, Mutual Information = 2 bits
- Result: Computed values match theoretical predictions within numerical precision

3. GHZ States:

- Three-qubit maximal entanglement: $|\text{GHZ}\rangle = (|000\rangle + |111\rangle)/\sqrt{2}$ [8]
- Expected: Zero pairwise entanglement, maximal three-tangle
- Result: Three-tangle = 1.0, pairwise negativities vanish correctly

4. W States:

- Three-qubit state: $|\text{W}\rangle = (|100\rangle + |010\rangle + |001\rangle)/\sqrt{3}$ [8]
- Expected: Non-zero pairwise entanglement, zero three-tangle
- Result: Pairwise negativities correctly computed, three-tangle vanishes

8.2 Validation Metrics

For each test state, we verify:

- **Trace preservation:** $\text{Tr}(\rho) = 1$ for all reduced density matrices
- **Positivity:** All eigenvalues of ρ are non-negative
- **Hermiticity:** $\rho = \rho^\dagger$ for all density matrices
- **Entanglement bounds:** $0 \leq N(\rho) \leq (d-1)/2$ for d -dimensional systems
- **Information bounds:** $0 \leq I(A:B) \leq 2 \min(S(A), S(B))$

All validation tests pass with numerical precision better than 10^{-10} for double-precision arithmetic.

8.3 Encoding Consistency Checks

An important validation concerns the relationship between Binary and Gray encodings. While these encodings can produce different entanglement values (demonstrating encoding dependence), certain global properties should remain invariant:

- **Total system entropy:** $S(\rho_{\text{total}})$ should be identical for both encodings
- **Global purity:** $\text{Tr}(\rho^2)$ should be encoding-independent
- **Sum rules:** Certain sum rules for entanglement must hold regardless of encoding

We verify these consistency conditions for all test states, confirming that encoding differences affect subsystem properties but preserve global invariants as expected.

9 Discussion and Applications

9.1 Investigating Encoding Dependence

The primary application of these tools is to systematically investigate whether and how encoding choices affect quantum information measures. Key questions that can be addressed include:

- Do different encoding schemes (Binary vs Gray) produce different entanglement patterns for the same field state?
- Which qubits show the strongest encoding dependence in their correlations?
- Are there parameter regimes where encoding choice becomes particularly important?
- Can we identify universal features that are encoding-independent?

By running both `QubitInfoPanel[]` and `QubitInfoPanelGray[]` on the same input state and comparing results, researchers can quantify encoding effects and determine their relevance for specific applications.

9.2 Basis-Dependent Quantum Correlations

The ability to compute in both Fock and phase bases enables investigation of complementary aspects of quantum correlations:

- Which correlations are enhanced in phase basis versus Fock basis?
- Are there states where phase basis reveals entanglement invisible in Fock basis?
- How do basis and encoding choices interact to determine measured properties?

These questions are relevant for designing optimal measurement strategies and understanding the full structure of quantum correlations in field systems [9,16].

9.3 Application to Various Quantum Systems

While our motivation comes from cavity quantum electrodynamics, these tools have broader applicability:

- **Quantum optics:** Analyzing squeezed states, coherent state superpositions, and cat states
- **Circuit QED:** Studying qubit-resonator systems and photon state engineering
- **Quantum information:** Investigating optimal encoding for quantum communication
- **Quantum metrology:** Understanding how digitization affects measurement precision

Any system involving quantized bosonic modes that needs to be interfaced with discrete qubit processors can benefit from these analysis tools.

9.4 Representation Engineering

An emerging concept enabled by these tools is representation engineering: the deliberate choice of encoding and measurement basis to optimize specific quantum information properties. For instance:

- Maximizing accessible entanglement for specific field states
- Minimizing decoherence effects through appropriate encoding
- Enhancing specific correlation patterns relevant for applications
- Balancing multiple objectives through encoding optimization

Our tools provide the computational infrastructure needed to explore this space systematically and design optimal encoding strategies for specific goals.

10 Conclusions

We have presented QubitInfoPanel[] and QubitInfoPanelGray[], comprehensive computational tools for investigating the quantum digitization of electromagnetic

field states. These Mathematica-based functions provide researchers with the capability to:

- Encode arbitrary field density matrices into qubit registers using Binary or Gray code schemes
- Compute comprehensive quantum information measures including entanglement, mutual information, and entropy
- Analyze states in both Fock and phase measurement bases
- Systematically investigate encoding-dependent and basis-dependent quantum properties

The quantum digitization problem—how to represent continuous field states as discrete qubit registers—is fundamental to the interface between quantum field theory and quantum information processing. Our work demonstrates that this is not merely a matter of convention: the choice of encoding scheme substantively affects the quantum correlations that are accessible through measurements on the qubit subsystems.

The parallel implementation of Binary and Gray encodings enables direct investigation of encoding effects. By comparing results from `QubitInfoPanel[]` and `QubitInfoPanelGray[]` on identical input states, researchers can quantify how encoding choice influences entanglement patterns, mutual information structures, and other quantum information measures.

Similarly, the support for both Fock and phase bases allows exploration of basis-dependent quantum correlations, revealing complementary aspects of the quantum state that may not be apparent in a single representation.

Extensive validation against known quantum states (Bell states, GHZ states, W states, and product states) confirms the correctness of our implementation. All computed measures satisfy appropriate bounds and reproduce theoretical predictions to high numerical precision.

These tools open new avenues for research at the intersection of quantum field theory and quantum information science. Potential applications include:

- Systematic exploration of representation-dependent quantum properties
- Design of optimal encoding schemes for specific quantum information tasks
- Investigation of quantum phase transitions and critical phenomena in encoded systems
- Development of novel quantum measurement strategies

Looking forward, several extensions are possible. Additional encoding schemes beyond Binary and Gray (such as qutrit encodings or custom optimized

encodings) could be incorporated. More sophisticated multipartite entanglement measures beyond three-tangle could be added for larger systems. Integration with quantum simulation packages could enable direct application to specific physical systems.

The fundamental insight enabled by these tools is that the quantum digitization problem is not merely a technical detail but a substantive physical choice that shapes the observable properties of quantum systems. As quantum technologies increasingly require interfaces between continuous and discrete quantum systems, understanding and optimizing these encoding choices will become crucial.

We have provided the research community with validated, flexible tools to explore this landscape systematically. By enabling direct comparison of different encoding schemes and measurement bases, `QubitInfoPanel[]` and `QubitInfoPanelGray[]` facilitate investigation of representation-dependent quantum information—a frontier that promises both fundamental insights and practical applications in quantum technology.

References

- [1] M. A. Nielsen and I. L. Chuang, *Quantum Computation and Quantum Information*, Cambridge University Press, Cambridge (2000).
- [2] J. von Neumann, *Mathematical Foundations of Quantum Mechanics*, Princeton University Press, Princeton (1955).
- [3] T. M. Cover and J. A. Thomas, *Elements of Information Theory*, 2nd ed., Wiley-Interscience, New York (2006).
- [4] A. Peres, "Separability Criterion for Density Matrices," *Phys. Rev. Lett.* 77, 1413 (1996).
- [5] M. Horodecki, P. Horodecki, and R. Horodecki, "Separability of mixed states: necessary and sufficient conditions," *Phys. Lett. A* 223, 1 (1996).
- [6] G. Vidal and R. F. Werner, "Computable measure of entanglement," *Phys. Rev. A* 65, 032314 (2002).
- [7] V. Coffman, J. Kundu, and W. K. Wootters, "Distributed entanglement," *Phys. Rev. A* 61, 052306 (2000).
- [8] W. Dür, G. Vidal, and J. I. Cirac, "Three qubits can be entangled in two inequivalent ways," *Phys. Rev. A* 62, 062314 (2000).
- [9] R. Horodecki, P. Horodecki, M. Horodecki, and K. Horodecki, "Quantum entanglement," *Rev. Mod. Phys.* 81, 865 (2009).
- [10] F. Gray, "Pulse code communication," U.S. Patent 2,632,058 (1953).

-
- [11] S. M. Barnett and P. M. Radmore, *Methods in Theoretical Quantum Optics*, Oxford University Press, Oxford (1997).
- [12] D. F. Walls and G. J. Milburn, *Quantum Optics*, 2nd ed., Springer-Verlag, Berlin (2008).
- [13] W. K. Wootters, "Entanglement of Formation of an Arbitrary State of Two Qubits," *Phys. Rev. Lett.* 80, 2245 (1998).
- [14] C. H. Bennett, D. P. DiVincenzo, J. A. Smolin, and W. K. Wootters, "Mixed-state entanglement and quantum error correction," *Phys. Rev. A* 54, 3824 (1996).
- [15] A. Acín, D. Bruß, M. Lewenstein, and A. Sanpera, "Classification of Mixed Three-Qubit States," *Phys. Rev. Lett.* 87, 040401 (2001).
- [16] L. Amico, R. Fazio, A. Osterloh, and V. Vedral, "Entanglement in many-body systems," *Rev. Mod. Phys.* 80, 517 (2008).

Data-Driven Approaches to Student Retention: Analysis of Dropout Trends in the Measurements Laboratory

Dr. Zsolt Markella

Department of Instrumentation and Automation, Kando Kalman Faculty of Electrical Engineering, Obuda University, Budapest 1084, Hungary, 17. Tavaszmezo str., markella.zsolt@uni-obuda.hu

Dr. Jozsef Papp

Department of Instrumentation and Automation, Kando Kalman Faculty of Electrical Engineering, Obuda University, Budapest 1084, Hungary, 17. Tavaszmezo str., papp.jozsef@uni-obuda.hu

Abstract: This paper presents a data-driven investigation of student dropout in the Measurements laboratory, a core course in electrical engineering education. By analysing decades of performance and motivation data, with a focus on recent years, we identified key social, Curricular, and infrastructural factors influencing dropout. We highlight student attitudes and instructional conditions that strongly affect retention. The research aims to reveal intervention strategies that foster active student participation and competence development while maintaining academic standards and promoting long-term retention.

Keywords: student dropout, data-driven analysis, measurements laboratory, electrical engineering education, Curriculum development; motivation and retention

1 Introduction

"It is not enough to recruit the student; you need to retain them!" is more often said at faculty, department, or educational committee meetings where dropouts, defined as students who fail to meet course requirements, are the main focus. Based on the experience of recent decades, it has become clear that student retention is not only an educational policy issue but also a matter of methodology, institutional culture, and the social environment. Seemingly simple solutions, such

as easing requirements, simplifying the examination system, or making accountability more 'approachable,' appear to offer a way forward, yet they can also lead to a reduction in professional standards. Education, particularly in engineering, is not a market-driven solution in the long term.

The measurements course is one of the fundamental pillars of electrical engineering education, which develops the fundamental competencies of practical engineering: data collection, analytical thinking, error estimation, and accurate documentation. Based on our written records from educational practice over the past 40 years, a long-lasting trend emerges: early school leaving approaches 25% annually. About half of this, i.e. 12-15%, represents the proportion of students who do not attend laboratory sessions, fail to submit mandatory reports, or have no contact with teachers. The remainder – around 10-13% – is due to educational inadequacy, i.e. formal but incomplete fulfillment of the requirements. In recent years, we have conducted various investigations at both institutional and departmental levels to identify the causes of the phenomenon. Motivational surveys and questionnaires mapping study habits and student attitudes clearly indicate that the level of early school leaving is significantly influenced not only by the difficulty of the learning content but also by student engagement, learning self-efficacy, community embeddedness, and teaching communication style. The purpose of this article is to determine how to reduce drop-out rates based on decades of experience and empirical data from recent years, and whether this can be achieved without the active involvement of students. (Spoiler Alert: No)

The history of measurements course also reflects changes in electrical engineering education. From the outset, the course matter has been part of the core curriculum: it aims to provide students with the practical knowledge essential to engineering in a laboratory environment. As a result, detailed records of the courses teaching – and thus student performance – have been available for decades, and measurements have evolved in recent years. This is in itself a great advantage: it provides an opportunity to analyze trends over time and draw predictive conclusions. However, conducting such historical comparisons is challenging. The educational environment, the composition of the student body, social and market expectations, and curriculum structures have changed over the past 10-15 years to such an extent that historical data alone no longer provide adequate insight into the current situation.

The transformation of the social and economic environment, in particular the digitalization of industry, automation, and the rise of artificial intelligence, requires new competencies from electrical engineers. While two decades ago the focus was on knowledge of analogue circuits, operation of handheld measuring

devices, and traditional laboratory protocols, today the focus is on data processing, the integration of sensor systems, digital signal processing, and the automated evaluation of measurements, sometimes augmented by artificial intelligence. The modern electrical engineer therefore perceives not only a ‘measuring’ process but a system, interprets data, and is able to incorporate measurement results into a complex AI-enabled process.

Adapting the curricula of higher education institutions, including the Kálmán Faculty of Electrical Engineering, reflects this change. The new curricula incorporate competence-based approaches, project-oriented education, and practice-oriented course structures. However, this shift in metrology education is particularly complex, as laboratory education is heavily burdened both in terms of human resources and infrastructure. A laboratory requires dozens of identical devices, measuring instruments, and sensors, the maintenance, repair, and updating of which consume significant financial resources. At the same time, there is uncertainty on the human resources side: as experienced trainers retire, replenishment is difficult, there is often a lack of a proper competency framework, and the training of young educators is often not systematic. This situation has a negative impact not only on the maintenance of professional standards, but also on student motivation. In the case of a course that is essentially practice-oriented, the lack of physical presence, leading by example, and mentoring are particularly detrimental to student engagement.

Against this background, early school leaving is not only a problem of educational methods but also a systemic challenge. However, change is always possible. Within the framework of the current curriculum, we can also implement fine-tuning measures that improve efficiency, reduce dropouts, and enhance the student experience, without undermining professional standards. The aim is to restore Kando’s status as a higher education institution that preserves its prestige with dignity and is proud of its traditions, while remaining modern, open, and attractive to young engineers. [1]

The paper therefore not only discusses the causes and motivational aspects of early school leaving but also seeks to highlight ways to sustainably improve the effectiveness and experience of the measurements course by fine-tuning educational structures, resources, and student attitudes. “Because it is not enough to recruit the student – they must be retained.” And this retention is not just a matter of the curriculum but a shared responsibility of the community, the teacher, and the student.

All in all, due to the changes in the environment surrounding the student, comparing the data currently measured with historical data is only possible with a high degree of approximation. In many cases, we have attempted this, but the conclusions drawn from the results have almost always been flawed. It should be noted that the two half-year measurements currently in use were developed through the efforts of more than a dozen professionals over the past decades. Although continuous changes occur year after year, they are primarily reflected in how knowledge is processed by students and in the form of the digitalisation of accountability.

2 Purpose and Tasks of the Measurements Laboratory

The measurements lab is one of the most important practical **courses** in electrical engineering education, which aims to equip students with the basic theoretical and practical knowledge **required** to measure electrical and non-electrical quantities. Laboratory work is the stage of electrical engineering training where theoretical knowledge is converted into **practical experimentation, observation, and analysis**. Here, students are first confronted with the fact that **electrical quantities** are not just calculation tasks, but are realistically measurable physical quantities **subject to measurement uncertainty**, the precise definition of which is the basis for industrial, research and development processes. Accordingly, the primary task of laboratory professionals is to **ensure the practical understanding and application** of the principles of measurement of basic electrical quantities, such as voltage, current, resistance, power and energy. During the lab, students should learn the principle and treatment of different measuring instruments, such as analogue and digital multimeters, oscilloscopes, **function generators**, power supplies, signal generators. They should also learn the correct interpretation of technical data, the determination of measurement limits and accuracy, and the **selection** of the appropriate measurement method for a given problem and task.

More broadly, the aim of the Lab is not only to practise the use of instruments, but also to develop a comprehensive engineering approach. Students are required to make decisions in every measurement exercise (not as isolated choices, but by learning the underlying principles, applying the guideline-proposed solutions, and validating their conclusions): what method is used, how measurement error is minimised, how the result is validated, and how the

measurement process is documented. This decision-making develops analytical thinking, problem-solving skills and responsible engineering practice.

The laboratory's tasks include the presentation of techniques for measuring non-electrical quantities, such as temperature, pressure, displacement, velocity. These measurements are often carried out through sensors, transducers and sometimes measuring amplifiers, thus giving students an insight into the foundations of sensor technology and signal processing. In parallel, they will learn about the foundations of measurement automation: they learn how to connect measuring instruments to computer systems, how data are collected, digital signal processing and automated evaluation of results.

During the lab measurement exercises, students will also learn about modern applications of artificial intelligence (AI). The measurement results, in particular when measuring non-electrical quantities, are processed and evaluated using AI algorithms. AI tools enable the automated implementation of noise filtering, error calculation and data correlation, thereby improving students' data analytics competences and digital engineering mindset.

During the Lab, students acquire a number of core competences:

- **Professional competencies:** practical knowledge of measuring electrical and non-electrical quantities, safe and professional use of measuring devices, correct interpretation of measurement data.
- **Methodological competencies:** design of measurement procedures, error calculation, accurate management of measurement report, validation and presentation of results.
- **Digital competences:** computer control of measuring instruments, recording of data, AI-based data processing and understanding of automated measuring systems.
- **Personal and social competences:** self-employed and collective work, responsibility, time management, communication and cooperation.

The aim of the laboratory work is to provide students with technical skills and to help them understand the essence of engineering: the relationship between measurement, interpretation and decision-making. The Lab is therefore not merely a practical course, but one of the most important fields for shaping the professional identity of an electrical engineer, where students learn that precise

measurement is not only a technical issue but also a matter of engineering judgement.

3 What are the reasons for Student dropout?

Student dropout, particularly in the field of technical and engineering training, is a complex, multifactorial phenomenon that cannot be attributed to a single cause. On the basis of the written documentation, meeting minutes, teachers' reports and feedback from students over the past 40 years, as well as the surveys of recent years (motivation data, self-efficacy measurement, learning style data), it is clear that not only learning gaps, but also social, motivational, methodological, organisational, and infrastructural factors contribute to laboratory dropouts in metrology. [2]

It is important to emphasise that the purpose of the paper is not to identify those responsible, but to systematically identify the problem in order to identify the points where intervention, change or improvement is possible. (The paper is also intended to assist efforts to reduce drop-outs in similar laboratories.) The reasons listed often do not appear in isolation, but produce negative effects by strengthening each other and compounding each other. Sequential numbering reflects both the ease of identification and the relative order of frequency and importance. [3] [4] [5] [6] [7]

1. Lack of active involvement – lack of motivation

The most common and most striking reason is the lack of active participation. If the student does not appear in the lab, does not take part in the exercises, does not prepare a report or does not contact the teacher, student dropout is almost inevitable. Lack of motivation often occurs at the beginning of the semester: the student does not see the practical benefit of the course and does not perceive it as relevant to his or her future career. This attitude strengthens the 'not important, next year' approach, which ultimately leads to the abandonment of the course. We would like to mention that even in the social situation mentioned below (working alongside studies), we may never meet the student. The lecturer does not have the time or resources to contact all students who are permanently absent and offer them a tailor-made solution to complete the course. See proposed solutions.

2. Changing social context

Today's students grow up in a different social and cultural context than their peers up to ten years ago. Digitalization, instant access to information and the proliferation of online learning have also changed learning behaviour and learner expectations. Traditional face-to-face laboratory education is often unfamiliar to them. The need for quick feedback, the "short attention span" and the multitasking

culture make sustained, precise work, which is essential in measurement, more difficult.

3. Work-Study overload

More and more students are forced to work alongside their studies, whether on a part-time or full-time basis. This is primarily due to financial necessity, but it results in a lack of laboratory visits, fatigue, divided attention, and a deterioration in academic performance. The Measurements Lab, which is linked to fixed times, preparations and precise work, is particularly susceptible to this problem.

4. Timetable conflicts

Scheduling conflicts, parallel laboratory times, or late evening lab assignments often lead students to treat the metrology laboratory as dispensable. The priority is logical: students tend to choose a course where attendance is less mandatory or where performance can be replaced more easily.

5. Insufficient basic competencies in public education

One of the deepest problems in technical training is the lack of basic mathematical and physical competencies from school education. Understanding measurement principles, circuit behaviour, error calculations or logarithmic relationships (logarithms are no longer part of secondary-school graduation requirements) is difficult for many students because the theoretical background is not solid. This uncertainty can easily lead to an experience of failure and ultimately to the abandonment of the course.

6. Lack of problem-solving competency

The measurements lab requires not only rote knowledge, but also creative problem-solving. The student will often have to respond to unexpected situations, such as erroneous measurements, malfunctioning devices, noisy signals, or incorrect reported values. Those who do not have the right analytical or deductive thinking tend to freeze and lose motivation as a result of failure.

7. Changing entry requirements, curriculum instability

The continuous adaptation of higher education curricula, the adaptation of the credit system and the introduction of new course structures often create uncertainty. The student does not know what is mandatory, when the lab has to be completed and what prior knowledge is required for it. This curriculum 'movement' also generates confusion on the instructional side, so the requirements are not always consistently applied.

8. Curriculum errors and course conflicts

It sometimes occurs that students pass prerequisite courses without fully mastering the material, or that instructors explain theoretical concepts in a

different way than the approach we intend to build upon in the measurements laboratory. As a result, students may enroll in the measurements laboratory without possessing the necessary and reliable theoretical background (e.g., a solid understanding of basic electrical engineering). In such cases, interpreting and carrying out the laboratory assignments can be challenging, which may ultimately lead to student attrition.

9. Changing learning habits

The modern student studies differently: relies on short digital content, video sources, and quick search. However, the Lab requires structured, step-by-step thinking. Measurements require patience, accuracy and protocol discipline, which are often lacking in today's students, who are accustomed to an immediate sense of success.

10. Not knowing One's own learning methods

Some students fail not because of a lack of ability, but because of a lack of effective learning methods. They do not know how to process, take notes, repeat or prepare independently for a laboratory. The lack of learning techniques often leads to low motivation and loss of self-confidence.

11. Excessive requirements and limitations

Teachers sometimes impose excessively rigid requirements that do not take into account student heterogeneity. The "everyone does the same" approach does not take into account different prior training, interests and learning background. Such rigid expectations can easily demotivate students who in the end tend to drop the course.

12. Educational diversity and inconsistency

Due to the large number of students, the Measurements course is taught by several instructors, each of whom—within certain prescribed limits—teaches it differently. Divergent evaluation criteria (e.g., for laboratory reports), communication styles, and the misinterpretation or neglect of certain requirements create situations that may be perceived as discriminatory. In courses taught by 'lenient' instructors, students tend to pass with insufficient mastery, whereas courses taught by 'strict' instructors often exhibit a high failure rate. This imbalance undermines the credibility of the instruction and erodes students' trust.

13. Lack of instructor alignment and uniform assessment standards

Although instructor autonomy is a value, certain courses—particularly laboratory-based instruction—require standardized expectations. The absence of uniform requirements, scoring rubrics, and ethical guidelines results in unpredictability, which generates uncertainty and mistrust on the student side. We note that in the case of the Measurements course we are actively working to

mitigate these effects through unified grading rubrics, a consistent schedule, and standardized assessment practices.

14. A wide range of assessments and performance checks

The variety of assessment forms—such as preliminary quizzes, on-the-spot pop-tests, laboratory notes, appendices, and measurement tasks—can easily overwhelm students. When these assessment elements do not operate within a coherent and transparent system but appear ad hoc, students may quickly lose motivation due to lack of clarity and increased stress. The subjective nature of evaluation further contributes to dissatisfaction. Meanwhile, other course components tend to be under-assessed.

15. Lack of laboratory familiarity

The Lab is an unfamiliar environment. Some students come without ever having visited the lab – they do not know where the devices are, how the measurement bench works, or what to do and what is not. This creates uncertainty and fear that hinders active participation.

16. Lack of familiarity with the Instructor

The lack of personal contact is also a significant factor. If the student is not familiar with the teacher's style, expectations, communication style, it is more difficult to adapt. The lack of trust between the lecturer and the student often amplifies the fear of error – so the student tends to avoid confrontation and does not come to the lab.

17. Initial attitude: “can suffer through it for a few credits”

Student attitudes are one of the strongest indicators of early school leaving. If the course matter appears from the outset as an ‘additional burden’ in the eyes of the student, the effort required to complete it appears disproportionate. Such an initial attitude leads easily to leaving the laboratory.

18. Obsolete assets, infrastructure

The ageing of the laboratory equipment stock is not only a technical problem, but also a motivational one. Students come from a digital environment where technology develops rapidly – if they meet 30-year-old instruments in the lab, their belief in the relevance of education is undermined. Moreover, outdated infrastructure increases the likelihood of error and reduces measurement accuracy.

19. Changed interfaces and modes of contact

The modern student expects immediate digital communication. The organisation of the laboratory, the flow of information and its feedback only by traditional means (e.g. a wall notice, e-mail) can easily lead to a loss of

information. Consequence of inappropriate communication: lack of information, misunderstanding of deadlines, omitted laboratory.

20. Problems with quantitative assessments

Surveys often do not measure competences, but rather memorised knowledge. The aim of the measurements lab would be to assess practical skills, yet the focus may be on formal error checking rather than understanding. This creates frustration, a sense of unfairness, and reduces the prestige of the course in the long term.

As can be seen from the list, early school leaving is not the result of a single factor, but is the result of a number of interrelated factors. Motivational, infrastructural, curriculum, teaching and student factors play a role in ensuring that a student reaches the successful completion of the course. It is important to stress that systemic solutions should be sought rather than individual culpability.

4 Possible solutions to the identified causes

Student dropout, whatever its deep roots in the education system, is not an unchanging phenomenon. Our experience, analyses of recent decades, and modern educational methods have shown that effective institutional, teaching, and student cooperation, deliberate organisation, and the smart use of technological opportunities can significantly reduce the problem. However, achieving meaningful change requires commitment and adaptation from all stakeholders: pedagogical renewal from lecturers, greater responsibility and engagement from students, and a more flexible organisational and infrastructural framework from the university. Building on the twenty-one reasons presented in the previous chapter, possible solutions, proposals, and directions for improvement are set out below. [4] [5] [6] [7]

1. Addressing the lack of active involvement – strengthening motivation

The key to increasing student activity is to enhance student motivation. This requires emphasising the relevance of the laboratory: at the beginning of the classes, the instructor should briefly outline how the laboratory tasks relate to real industrial practices. It is advisable to introduce “engineering exercises” where students solve simulated industrial problems. Gamification elements (e.g. measurement challenges, point collection, ranking lists) can also be used to foster greater individual accountability. Out-of-lab activities – online preparation, short preliminary questions – also increase engagement.

2. Adaptation to changing societal contexts

Education should align with the learning habits of the generations of students (generation Z). To this end, the active use of the lab-related digital learning environment (LMS, Moodle, Teams) is essential. Video demonstrations, interactive notes, and online measurement guides for laboratory tasks help students prepare, reducing uncertainty. In-person education can thus focus on problem-solving, not on basic explanations, if students review these materials. Unfortunately, in many cases this is not even the case, so even if the trainer is trying to adapt, these efforts may still fall short.

3. Reconciling work and learning

Supporting students who study alongside employment is also the university's social responsibility. Flexible management of laboratory schedules, provision of make-up opportunities, and the introduction of online laboratory simulations where the student can use virtual tools and platforms are recommended. In addition, there is a need to balance students' workload – the course requirements should be designed taking into account realistic time commitments. Students who are permanently absent should be contacted by a dedicated faculty-level team and jointly identify joint solutions to prevent course withdrawal. (This is already the practice of leading Western universities – which can directly contribute to reducing student dropout.)

4. Solving timetable problems

At the level of the study system, timetable conflicts should be prevented. Centrally coordinated management of laboratory schedules and communication between lecturers are essential. Involving students in the design of schedules (e.g. through a preliminary survey) increases the willingness to participate.

5. Strengthening core competencies

Gaps resulting from prior educational preparation need to be filled with catching-up courses. The online module 'Preparatory measurements' should be introduced to cover basic physical, mathematical, and statistical concepts. This may be complemented by a self-assessment test to help the student assess their own competence.

6. Developing problem-solving competence

In the lab, students should not receive predefined solutions, but rather engage in self-directed analysis. To support this, a methodology for "measurement incidents" should be introduced, in which students receive deliberately erroneous measurement data and their task is to identify the cause of the error. This also improves analytical thinking and engineering reasoning.

7. Curriculum stability and communication

Frequent curriculum changes make requirements difficult to follow. Advance communication and standardised documentation are important: curriculum

changes should be presented annually in a single faculty forum and communicated to students in a clear and accessible manner. Transparency creates a sense of security.

8. Handling curriculum inconsistencies and course conflicts

A precise review of course prerequisites and dependencies is essential. The measurements laboratory should be accessible only to students who have successfully completed all required prerequisite courses. In addition, coordination meetings among instructors should be organised to ensure alignment between theoretical instruction and practical laboratory content.

9. Adapting to learning habits

It is possible to keep modern students engaged with brief, focused, visually rich teaching materials. The lab-related micro-contents – short videos, infographics, tips – help support independent preparation. The role of the instructor in the lab thus becomes a facilitator who supports rather than merely assesses the learning process.

10. Development of learning techniques

Universities and educators should support the development of learning-methodology competencies. Within the context of the course, a short introductory module or workshop would be useful to show how to effectively take notes, take structured notes, and perform error calculations. Learning to learn is as important as measuring itself. The F-curriculum includes several courses in the first and second semesters. There is limited evidence regarding its effectiveness, but it should play a clear role in developing learning techniques, including the use of AI-enhanced technologies.

11. Balancing requirements and flexibility

Course requirements should be clear yet adaptable. The objective is not ‘selection’ but competence development. It is advisable to introduce a requirements template for instructors, which provides guidance while still allowing for pedagogical creativity. Differentiated assessment practices may be applied, taking into account individual rates of student progress.

12. Reducing instructor inconsistency

It is beneficial to organise joint methodological workshops for instructors teaching the course, in which evaluation criteria, communication policies, and expectations are aligned. A shared approach helps harmonise the quality of instruction and reduces perceptions of unfairness.

13. Establishing a uniform set of requirements and a Code of Ethics

A department-level code of ethics and professional conduct can support greater consistency. Such a framework should include principles of assessment, guidelines for instructional behaviour, and provisions for the protection of student rights. A unified system increases transparency and predictability in the course.

14. Standardising accountability and evaluation

Instead of relying on a wide variety of assessment formats, a competence-based assessment model should be introduced—one that evaluates not only theoretical knowledge but also practical skills, problem-solving abilities, and autonomous work. Assessment should be transparent, with a predefined scoring scheme for each laboratory measurement task.

15. Development of laboratory familiarity

A “laboratory introduction session” should be held at the beginning of the semester, where students learn about tools, rules, and the working environment. A short interactive tour or video overview reduces anxiety and increases comfort. It is important to note that if students were to visit the laboratory under the ‘knowledge’ component of another course early in the academic year, the frustration resulting from a lack of laboratory-specific knowledge could be significantly reduced.

16. Teacher knowledge and communication

Strengthening interpersonal interaction is essential. The presentation sessions at the beginning of the semester, where the instructor shares their professional experience and expectations, build trust. Empathy, supportive communication, and regular feedback from the instructor are key. As a result, students feel they are partners in the learning process.

17. Change Initial Attitude

The assessment of the course should be shaped during the first session. The relevance of the measurements lab should be illustrated with real industrial examples: how it appears in everyday technology, automation, medicine, or energy. If the student feels valued, their attitude is likely to be more positive.

18. Development of infrastructure

MODERNISATION OF THE LABORATORY EQUIPMENT IS ESSENTIAL. Modern, computer-driven instruments, AI-based data processing systems, and digital labs increase not only efficiency but also student motivation. It is also important to maintain laboratory hygiene and the physical environment: an orderly, modern space conveys professionalism. It is an acknowledged challenge that we are lagging behind in this area. (e.g., regular cleaning in the laboratory is required; otherwise, only waste bins are emptied for weeks, which is unacceptable.)

19. Modernisation of communication channels

The communication platforms used by students (WhatsApp, Messenger, Discord) should be integrated into the educational process. The laboratory information, deadlines, and evaluations should be available in a single interface. Prompt notifications help prevent loss of information.

20. Rescaling accountability

The final evaluation of the laboratory should be competence-based and reflective. Students should not only provide measurement results, but also assess their own performance: what they did well, where they made mistakes, and what they learned. Such self-reflection tasks promote deeper learning and help reduce purely formal forms of failure.

Conclusion

If the solutions described above were to be implemented systematically, the measurements lab would have a completely new face. Students would not experience the course as a burden, but as a challenge. Educators would work with a common methodology, a motivating environment and modern tools, while the chair and university would operate a flexible student-centred system. The Lab would not be an intimidating but an inspiring space: a real engineering workshop where students can safely make mistakes, learn from each other and educators. Collaborative education would restore the prestige of engineering education and students would leave university as competent, autonomous and creative professionals. Although early school leaving is a complex problem, the solution lies in the community – where teachers, students and institutions work for a common goal: to ensure that knowledge is not lost but grows.

Authors' Declaration

The authors acknowledge the use of the European Union's *Multilingual Services* for linguistic revision purposes. The service was employed exclusively to correct English-language inaccuracies and improve textual clarity.

References

- [1] Beemt, A., Groothuijsen, S., Özkan, L., & Hendrix, W. (2022). Remote labs in higher engineering education: engaging students with active learning pedagogy. *Journal of Computing in Higher Education*, 35(2), 320-340. <https://doi.org/10.1007/s12528-022-09331-4>
- [2] Zhang, G., Anderson, T., Ohland, M., & Thorndyke, B. (2004). Identifying factors influencing engineering student graduation: a longitudinal and

- cross-institutional study. *Journal of Engineering Education*, 93(4), 313-320. <https://doi.org/10.1002/j.2168-9830.2004.tb00820.x>
- [3] Bullington, K., Tomovic, C., Dean, A., & Jovanović, V. (2025). A pathway to completion: student veterans pursuing engineering degrees. *Higher Education Quarterly*, 79(4). <https://doi.org/10.1111/hequ.70067>
- [4] French, B., Immekus, J., & Oakes, W. (2005). An examination of indicators of engineering students' success and persistence. *Journal of Engineering Education*, 94(4), 419-425. <https://doi.org/10.1002/j.2168-9830.2005.tb00869.x>
- [5] Khabiri, M. and Bahabadi, M. (2019). Teaching and learning of practical skills: learning from the pavement laboratory course. *Journal of Technical Education and Training*, 11(2). <https://doi.org/10.30880/jtet.2019.11.02.002>
- [6] Min, Y., Zhang, G., Long, R., Anderson, T., & Ohland, M. (2011). Nonparametric survival analysis of the loss rate of undergraduate engineering students. *Journal of Engineering Education*, 100(2), 349-373. <https://doi.org/10.1002/j.2168-9830.2011.tb00017.x>
- [7] Tandon, I., Maldonado, V., Wilkerson, M., Walls, A., Rao, R., & Elsaadany, M. (2024). Immersive virtual reality-based learning as a supplement for biomedical engineering labs: challenges faced and lessons learned. *Frontiers in Medical Technology*, 6. <https://doi.org/10.3389/fmedt.2024.1301004>

Implementing Digital Teaching-Quiz Strategies in the Measurements Laboratory: New Perspectives on Student Motivation and Knowledge Retention

Dr. Jozsef Papp

Department of Instrumentation and Automation, Kando Kalman Faculty of Electrical Engineering, Obuda University, Budapest 1084, Hungary, 17. Tavaszmezo str., papp.jozsef@uni-obuda.hu

Dr. Zsolt Markella

Department of Instrumentation and Automation, Kando Kalman Faculty of Electrical Engineering, Obuda University, Budapest 1084, Hungary, 17. Tavaszmezo str., markella.zsolt@uni-obuda.hu

Abstract: This paper presents the possibilities and methods of introducing digital teaching-quiz strategies in the Measurements laboratory at Kandó Faculty of Electrical Engineering. The quiz-based learning approach aims to enhance student motivation, reduce dropout rates, and improve the effectiveness of knowledge transfer. The study describes the preparation, implementation, and evaluation of quizzes, as well as the impact of this interactive learning environment on student participation and performance. The proposed approach highlights that regular digital quizzes can strengthen active learning, support continuous knowledge retention, and significantly contribute to the long-term development of engineering students' professional competencies.

Keywords: digital quizzes; interactive learning; student motivation; measurements laboratory; knowledge transfer; dropout reduction

5 Introduction

Fortunately, we have the opportunity to teach one of the core technical courses within the training programme (in 2025, electrical engineering training with the highest score threshold*) – Measurement Engineering. In our case, this means that all students of electrical engineering, regardless of the form or language of instruction, meet us during their studies. The material, tasks, problems and measurements of the course currently being taught have evolved over several decades, and it must be emphasized that the course is the result of decades of joint work with numerous highly qualified industrial and academic colleagues (Dr. Horváth Elek, Tényi V. Gusztáv, Baka Károly, Dr. Gellérthegeyi József, Dr. Molnár János, Dr. Tuzson Tibor, Szauter Ákos, Dr. Molnár Zsolt). Indeed, while the fundamental principles of the theoretical themes currently covered and the measurements compiled in the laboratory remain unchanged, its teaching approach reflects the most recent developments in both didactic and technological terms. For example, in 2025, in four measurements of non-electrical measurement techniques, artificial intelligence will be used to process data, visualize results (graphs), and prepare evaluations (protocols) to foster 21st-century soft skills.

The course Measurements is one of the key components of the initial training in electrical engineering, which takes place over two semesters (Measurements I and Measurements II), including one hour of lecture per week (scheduled in blocked sessions during the first seven weeks – two hours per week) and two hours of laboratory practice. There are currently 7×2 hours of lectures and video performances complementary to the course. A total of 23 laboratory measurements (12 in the first and 11 in the second semester) are carried out during the laboratory part, each accompanied by detailed guidance and video-based measurement demonstrations.

The laboratory is equipped with both modern and older instruments, enabling students to compare and learn classical and modern measurement techniques. Computer-aided data collection and processing are becoming increasingly important, although some of the computers in use are already outdated. Nevertheless, the flexibility of education, the gradual integration of digital tools and the development of new measurement protocols all point towards modern education.

In recent years, the level of student motivation has been measured several times, and although there is an improving trend, student motivation remains relatively low. According to statistical data, the failure rate of mid-term exams

remains high and the rate of absenteeism is also significant. In our experience, students often do not remember the material they have learned previously, even though repetition and reinforcement of knowledge are given special attention every semester.

These problems may be due to a number of factors: changing learning habits, passive use of digital tools, and lack of regular practice in acquiring practical knowledge. Engineering students increasingly fail to perceive the direct link between theoretical knowledge and practical lab tasks, which reduces their motivation and the completion rate of the course.

Against this background, it is necessary to renew the didactic approach and methodology in the teaching of the Measurements Lab. Our aim is to make the educational process more interactive, personalized and experience-oriented. One possible means of achieving this is the introduction of digital quizzes, which are built on students' active participation, immediate feedback and the progressive deepening of knowledge. This type of innovation in education can not only help to increase motivation but can also contribute to maintaining the teaching of Measurements as one of the strongest and most innovative core courses of the Kandó Faculty of Electrical Engineering.

6 Activities in the Laboratory

Our Education Goal

Our aim is to provide a basis for students to understand and apply measurement principles, techniques, and procedures in the context of laboratory training, not only at the theoretical level but also in practical contexts. We aim for students to learn the basic principles of measurement techniques through practical exercises: not just to read about how the instruments work in textbooks, but to engage with them directly—perform measurements, interpret data, and draw conclusions. Laboratory practice provides opportunities for students to work with instruments and procedures in a professional context, helping to ensure that measurement knowledge does not remain merely theoretical. In addition, it is important to adequately prepare students for the comprehensive examination at the end of the third semester, which comprises both theoretical and practical components, in particular the element of measurement technology. In order to pass the test, laboratory and measurement practice require continuous recall, application, and cumulative knowledge development.

Integration of Digital Learning technologies

Digital learning tools implemented in education, such as regular low-stakes quizzes, help students deepen their understanding through repetition and retrieval practice: research shows that such low-stakes assessments significantly enhance recall ability and long-term knowledge retention. [1] The resultant learning environment, which integrates practical exercises, instrument use, data processing, and feedback, contributes to transforming the Measurements from a mandatory course into a competence-development experience that students can rely on later in their professional practice and engineering careers.

The challenges of generation Z and education

The traditional distribution of university education – a distinct system of lectures and laboratory sessions – has worked well for many decades. However, with the emergence of Generation Z, it has become increasingly evident that this structure no longer meets the new learning expectations and cognitive characteristics of students (not to mention Generation Alpha, whose first members will begin university studies within a few years). Today's student wants not only to receive information, but also to play an active part in the learning process.

The traditional structure is dominated by frontal, passive modes of instruction, where students often play a receptive but not fully engaged role. Although laboratories offer opportunities for practical experience, students' attention, motivation, and concentration often wane, especially during long, monotonous measurement tasks. In our experience, many students engage in multiple activities at the same time (e.g. mobile phone use, social media engagement, or online presence), so attendance in classes does not necessarily imply real learning participation.

Generation Z, born between 1995 and 2010, represents the first truly digital-native generation. Having grown up in a continuous flow of information, multi-channel communication and immediate feedback form the basis of their cognitive functioning. According to McKinsey's research, this generation is 'True Gen', the generation of justice, which builds on authentic self-expression, pragmatic thinking, and community dialogue. For them, learning is not hierarchical but an interactive, community-based experience, where the use of digital tools is a natural part of information processing. They are capable of processing information from multiple sources simultaneously, demonstrating hypercognitive capabilities. At the same time, this continuous multitasking tends to reduce their ability to engage in deep concentration, as the brain cannot effectively shift attention between different tasks in the long term. [2] The members of Generation Z have been in contact with the internet, social media, and mobile technologies since early childhood. For them, the line between the online and offline worlds has become blurred, which significantly affects their concentration and attention management. As a result of continuous digital stimulation, their attention span has been reduced to a few minutes on average and, according to some research, to just

over one minute. [3] Attention fragmentation stems from constant connectivity to social media platforms: short videos, rapid information exchange, and immediate rewards all contribute to weakening the capacity for deep focus. [4] However, they are highly adaptive and value-driven – they are able to make rapid decisions and process new information efficiently when the learning environment is interactive and relevant enough for them. [5] Generation conflicts among young people often arise from the fact that education still largely follows the methodologies of previous generations, while Generation Z requires more participatory, visual, and digitally supported forms of learning. They do not consider knowledge to be static: they want to see its practical relevance and expect immediate feedback on their activities. [6]

The traditional lecture–laboratory system therefore presents a major challenge. Frontal education is less able to maintain attention; in laboratories, measurement tasks often become mechanical if there is no immediate interactive connection between the instructor and the student. It is therefore necessary to transform the educational model: laboratories should not only be rethought as places where measurement procedures are carried out, but as interactive spaces providing an engaging learning experience.

Learning for Generation Z is a cooperative and visual process: they prefer to work in teams, receive digital feedback, and develop through experiential learning. Solutions such as student quizzes, interactive measurement software, or real-time data analytics offer them opportunities for active participation and effective use of short attention cycles. The laboratory of future metrology is therefore not only a place for using instruments, but also for developing digital competences, problem-solving skills, and teamwork. Generation Z is motivated by seeing the meaning of the activity, by receiving rapid feedback, and by having opportunities for autonomous decision-making during learning. The aim is therefore not only to transfer knowledge, but also to create a lively, data-driven, and dynamic educational environment that fits the expectations of today's students and the engineering thinking of the future.

What educational didactic elements are we going to use

Nowadays, one of the major challenges of laboratory training in measurements is the problem of forgetting. Experience shows that students are able to acquire a significant amount of knowledge in a short period of time, but its retention and long-term integration into their practical knowledge system are difficult to ensure. The “quick forget” phenomenon is therefore not only a student issue but also a pedagogical challenge: how can knowledge be disseminated in such a way that it does not disappear from short-term memory within days or weeks?

As early as the end of the 19th century, German psychologist Hermann Ebbinghaus described the theoretical foundations of forgetting and, in his experiments, created the forgetting curve (Ebbinghaus, 1885). [7] This curve shows how fast memory performance declines after learning: 60–70% of the information acquired will be forgotten within 24 hours if there is no repetition. The process of forgetting is biologically determined – the brain conserves energy and retains only information that is regularly reused or linked to existing knowledge for long-term storage. Forgetting is therefore natural, but it has severe pedagogical consequences. Students, especially members of Generation Z, consume a large amount of information, but most of it is not integrated in a structured way into their knowledge system. Therefore, our educational goal is to make learning lasting through repetition, reinforcement, and prompt feedback, but this continuous transfer of knowledge is not feasible under the current curriculum. It is not possible to return to previous knowledge every hour, so there is a need for digital, interactive tools that automatically provide this functionality. [8] [9]

One of the most promising solutions could be the systematic use of a teaching quiz. The essence of teaching quizzes is to pose questions to students in small batches, without stakes, while providing immediate feedback. Such “low-stakes” quizzes can improve long-term knowledge retention by 20–30% by activating the “retrieval practice” mechanism – i.e., active recall. [10] [1] The systematic use of teaching quizzes improves memory consolidation more effectively than infrequent high-stakes examinations such as mid-term tests. [11]

In the Measurements Lab, we use teaching quizzes as a learning aid, not as an assessment tool. The aim is not to promote accountability, but to support memory retention. The short training quizzes that become available in Moodle are linked to individual measurements and can be retaken by students at any time. The quizzes provide a rhythm of repetition, as described by the Ebbinghaus curve: it is worth retrieving the information after one day, three days, and seven days after learning to create stable knowledge. Generation Z values traceability, transparency, and personalized feedback. We therefore organize laboratory exercises so that students can visibly monitor their progress and receive feedback for each measurement. In the traditional educational approach, errors were traditionally penalized, but we apply the principles of reward-based learning theory. If the student delivers on time and the test report meets the published criteria, an extra point is awarded – thereby strengthening not only discipline but also self-organization. The aim of protocol evaluation is to support the learning process, not to penalize errors. This “growth mindset” approach is in line with the expectations of Generation Z, who develop best through positive feedback and enabling environments. [12]

Generation Z also demands flexibility, psychological safety, and development opportunities in the workplace. The same applies to education: flexible learning pathways, mentoring, and adaptable workloads. [13] Our laboratory training is therefore modular – students receive at the beginning of the semester a schedule indicating which measurements they can perform and when. Considering breaks and replacement options, the pace of the learning process is predetermined. It should be noted, however, that the capacity of the laboratory infrastructure does not allow for fully individualized learning paces, but the large number of replacement and consultation options can help mitigate the resulting disadvantages. During measurement activities, however, individual autonomy increases learning responsibility and self-efficacy perception. [14 – this is our self-efficacy] [15] Mental health and development potential are also key factors. For Generation Z, excessive stress, unclear requirements, and negative feedback are demotivating. This is why we aim to communicate constructively and create a psychologically safe educational environment. Students can ask questions, express concerns, and receive feedback in the lab – not with the intention of being evaluated, but with the intention of developing. [16]

In the future development of the Measurements Lab, digital didactic elements will be integrated at all levels of education. One of these improvements is the production of guidance videos that show, step by step, the preparation of measurements, data collection, and evaluation processes. These videos will be available on the Moodle platform and will help students prepare and work independently. The use of video guides not only helps to maintain awareness but also supports the principle of multimodal learning – the student not only reads but also sees and hears the information, which, according to memory research, increases learning efficiency by 50–60%.

The integration of teaching quizzes into the Moodle system allows repetition and practice to be continually present in the learning process. These quizzes can be linked to lab tasks so that students can update their knowledge prior to each measurement by means of a short, targeted set of questions. Prompt feedback, scoring, and motivational elements (e.g., badges or commendations) create gamification effects, which are particularly effective in maintaining the attention of Generation Z.

7 Teaching quizzes

A “Teaching Quiz” or “T-Quiz” is a didactic tool whose primary purpose is to support the learning process rather than to serve accountability. We distinguish it from traditional quizzes primarily in terms of their function and perception: while the standard quiz is often presented as an instrument for evaluation – serving as both an assessment script and a measurement tool – the teaching quiz aims to activate and reinforce knowledge, and to support memory consolidation. Many perceive quizzes with pejorative connotations – ‘just a test’, ‘a list of questions at the end’ – but the teaching quiz has long surpassed this perception: as part of the teaching process, it is integrated into learning itself, rather than serving solely as an assessment tool. [12]

What is the teaching quiz?

The teaching quiz is a short, targeted set of questions that we apply throughout the learning process – not at the end of the course, but continuously. It provides immediate feedback, repetition, and pre-emptive reinforcement. A “no-stakes” quiz allows students to approach tasks with reduced anxiety, enabling them to focus more effectively on reinforcing knowledge. Research has shown that retrieval practice can be as effective, or even more so, than repeated re-learning for generating long-term knowledge. The teaching quiz is therefore not merely a “renaming” of the traditional quiz, but a methodologically reconceptualized learning support element. [12]

Types and structure of the teaching quiz

According to Racsmány, the structure and types of the T-quiz can be classified according to knowledge levels: factual, understanding, application, analysis, evaluation and synthesis issues. [12]

- **Factual T-quiz:** ask facts, definitions and data – for example: “Name...”, “What is...?” [12]
- **Understanding quiz:** capture the meaning and functioning of the topic – e.g. “Head...”, “Improve...”. [12]

- **Application T-quiz:** requires the application of the knowledge acquired to the new problem – “Calculate...”, “Choose...”[12]
- **Analytics T-quiz:** requires disaggregation, comparison, partial/whole relationships – “Analyse...”, “Why...?”[12]
- **Assessment T-quiz:** value judgement, critical thinking – ‘Assess...’, ‘What claim cannot be accepted...?’[12]
- **Synthesising/Creating T-Q:** calls for a new solution – “design, define..., Create...”. [12]

Proposed steps in the structure: a pre-test for the topic (short, simple questions), followed by a presentation of the curriculum, a short tutorial after the first part, with feedback, then a new topic part, followed by a quiz, etc. The timing of the repetitions is key: the frequency of quizzes is set according to the success rate – erroneous reminder → frequent repetition; successful reminder → less frequent repetition. [12]

Why would we like to use it in the measurements laboratory?

In a laboratory environment where students work with measuring instruments, collect, and evaluate data, teaching quizzes can be particularly valuable because they help develop “usable knowledge”: they do not merely assess whether students ‘know’ a concept, but whether they are able to develop, apply, and transfer it to new measurement contexts. The quizzes help to structure knowledge, build associative networks, and reduce students’ hesitation through repetition, thus supporting the development of long-term professional competencies. The teaching quiz is not an assessment tool, but a learning facilitator, thereby responding to contemporary learner needs and supporting the aims of the Measurements Lab, namely the development of competence-oriented engineering knowledge. This is particularly important for Generation Z, for whom learning is not merely a passive process, but an interactive, feedback-driven experience.

8 How to generate teaching quizzes

One of the key steps in the systematic implementation of teaching quizzes is the automated generation of questions or pre-structured quizzes, which can now be done much more efficiently with the help of AI-assisted tools. In our laboratory education environment – the course on Measurements– this means creating hundreds of questions based on textbook topics and generating them directly in Moodle-compatible format, so that they can be immediately imported into the learner interface. The great advantage of AI-based question generation is that it can be scaled up effectively and efficiently: many questions can be created for each chapter of the curriculum in a short period of time, thus continuously supporting the repetition mechanisms of the learning process. In addition, AI assistance allows for a variety of question types: different levels of difficulty, question formats and pedagogical interventions to be applied. [17]

Generation process

1. Selection of the theoretical content – the thematic chapters of the textbook serve as a starting point (e.g. ‘Ohm’s law and its applications’, ‘Digital multimeter errors’, ‘Data collection and signal-to-noise relationship’, ‘Bridge measurement with external sources of interference’, etc.).
2. Prompt design for AI – provide the theoretical description and specify the desired question type (e.g. multiple-choice, true/false, short answer) and define the question format as Moodle-compatible exports (e.g. in GIFT format, which can then be imported into a question bank). [17]
3. Question generation and processing – AI generates a set of questions that are subsequently reviewed, refined, and formatted as necessary (e.g. error correction, pedagogical alignment).
4. Import into Moodle – completed questions are exported in GIFT format to the Moodle system and integrated into the course question bank, from which they can be inserted into the tuition and quiz module.
5. Rhythm of deployment and repetition – schedule the quizzes appropriately: a pre-laboratory warm-up quiz, an intermediate checkpoint quiz, and a follow-up quiz. Immediate feedback and performance statistics are available to both students and instructors after each quiz.

AI-based question generation can produce large volumes of question banks that enable frequent retrieval practice and promote interleaving. This is particularly important in overcoming the challenges associated with the “take-up curve”. Lab-adapted quizzes help students reconnect with their instrumentation activities throughout the learning process—not only at the moment of measurement but also later, in a more conscious and reflective manner.

Let’s see a simple example!

In this example, we will generate a first-level factual t-quiz:

The prompt:

As a university lecturer, a practicing electrical engineer works in the measurements lab to change the teaching mode and didactics. As part of this: It is processed in the form of a voltage measurement, **T-arrow**. Create 2 factual T-quizzes (a simple choice and a pupil) asking for facts, definitions and data – for example: “Name...”, “What is...?” from the topic of voltage measurement. Add the result in Moodle gift format.

The response:

Feszultseg_MC1:What is the term that can be defined as the physical amount of voltage? {
= Potential difference between two points
~Current strength on the cross-section of a conductor
~Resistance in a circuit
~Performance in the consumer
}

Feszultseg_Match1:Match the terms and meaning of voltage measurement. {
=Voltmeter -> Device measuring voltage between two points
=SI unit -> Volt (V)
=Mode of switching -> Volt-meter connects in parallel to the points to be measured
=Ohm Act signals -> $U = I \cdot R$
}

Summary

In the learning–teaching process, teaching quizzes have become a central tool not only for assessment but also for creating active learning opportunities. The role of teaching quizzes lies in encouraging the development of knowledge (retrieval practice) through regular low-risk questions, thus contributing to long-term retention – not just short-term “evocation”. Research shows that regular quizzes can be a more effective tool to strengthen knowledge than re-learning alone. [18] At the same time, we need to be aware that our own forgetting is the main obstacle in education: after initial learning, memory retention drops rapidly; the so-called forgetting curve shows that much of the knowledge will disappear without repetition. This challenge can be addressed through teaching quizzes, as they can consolidate knowledge and transfer it into long-term memory through repetitive retrieval and immediate feedback. It is also important that our learning environment fits with different learning pathways and styles. Students have different learning styles – even if they do not have precise information on this: visual, auditory, and active learners – so teaching and learning should not follow a single template. The modular structure of the quizzes, offering choices, opportunities for self-practice, and prompt feedback, gives everyone the opportunity to progress at their own learning pace and get involved in a personalized way. Teaching quizzes are a strategic tool in our educational process – they help ensure that learning is inspired by experience, speedy, continuous

reflection and tailored to individual needs. Overcoming misconceptions, adapting to learning styles and continuously nurturing knowledge can all be implemented with this tool. The aim is not only to remember and apply knowledge – so that laboratory training in metrology becomes truly effective and sustainable.

Authors' Declaration

The authors acknowledge the use of the European Union's *Multilanguage Services* for linguistic revision purposes. The service was employed exclusively to correct English-language inaccuracies and improve textual clarity.

References

- [1] Kevin L. Kenney, Heather Bailey: Low-Stakes Quizzes Improve Learning and Reduce Overconfidence in College Students, In: Journal of the Scholarship of Teaching and Learning, Vol. 21, No. 2, June 2021, pp. 79-92 doi: 10.14434/josotl.v21i2.28650
- [2] Tracy Francis, Fernanda Hoefel: The influence of Gen Z-the first generation of true digital natives-is expanding, McKinsey & Company 18. November 2018.
- [3] Emily Stearn: Are you paying attention? Researchers pinpoint the exact number of minutes a person can concentrate before their all Wanders..., In: Daily Mail Health, 11. October 2024.
- [4] Hira Siddiqui: How Gen Z suffers from shrinking attention spans, URL: <<https://girlpowertalk.com/how-gen-z-suffers-from-shrinking-attention-spans/>>19. September 2024. (2025.10.27)
- [5] Vach Vivien: Generation in the workplace – with or against us? URL: <<https://mindsetpszichologia.hu/z-generacio-a-munkahelyen-velunk-vagy-ellenunk>> 24. July 2021. (2025.10.27)
- [6] URL: < <https://www.portfolio.hu/gazdasag/20230510/elmonda-a-szakertomiert-hadakoznak-a-fiatalok-az-idosebbekkel-614320#>> (27.10.2025)
- [7] URL: < https://hu.wikipedia.org/wiki/Hermann_Ebbinghaus> (27.10.2025)
- [8] Kendra Cherry msed: The Psychology of Forgetting and Why Memory Is Far From Perfect, 1 May 2025, URL: < <https://www.verywellmind.com/forgetting-about-psychology-2795034>> (27.10.2025)
- [9] URL: < <https://diakszemmel.hu/index.php/2025/03/az-emlekezesi-gorbehogyan-hasznalhatod-ki-a-tudomanyt-az-informacio-megorzesere/>> (27.10.2025)

- [10] URL: < <https://mipszi.hu/cikk/250331-t-kviz-azaz-egy-uj-innovativ-oktatasi-rendszer> > (27.10.2025)
- [11] URL: < https://oimb.elte.hu/dstore/document/12026/Racsm%C3%A1nyMea_V%C3%A1ndorgy%C5%B1%C3%A9s_2023.pdf > (27.10.2025)
- [12] URL: < https://www.researchgate.net/publication/344462177_Low-Stakes_vs_No-Stakes_Practice_Exams_in_Anatomy_and_Physiology_Classes_Which_One_Works_Better > (27.10.2025)
- [13] URL: < <https://hrpwr.hu/cikk/az-y-es-z-generacio-igenyei-ujrairhatjak-a-munkavallalok-es-munkaltatok-kozti-eroviszonyokat> > (27.10.2025)
- [14] Zsolt Markella, József Papp: Vajon az énhatékonyság és a motiváció mennyire befolyásolja az elsőéves villamosmérnök hallgatók lemorzsolódását? Temesvári, Zsolt; Wühl, Tibor; Molnár, György (szerk.) XXXVIII. Kandó Konferencia, Budapest, Hungary: University of Óbuda, Kapo Kálmán, Faculty of Electrical Engineering (2022) 419 p. pp. 171-180. 10 p.
- [15] URL: < <https://hrpwr.hu/cikk/kiderult-mik-azok-a-tenyezok-melyek-mindharom-generaciott-ott-tartjak-egy-munkahelyen> > (27.10.2025)
- [16] URL: < <https://hrpwr.hu/cikk/igy-segithet-a-hr-a-z-generacios-munkavallalok-mentalis-egeszsegenek-megorzeseben> > (27.10.2025)
- [17] Papp József: Segítség, Moodle feladatokat kell készítenem! Az MI asszisztensem segít - 1. rész, In: Wühl, Tibor (szerk.) XL. Kandó Konferencia Budapest, Hungary: University of Óbuda, Kandó Kálmán, Faculty of Electrical Engineering (2025) 232 pp. 142-148. 7 p.
- [18] Brenda W. Yang, Juan Razo, Adam M PERSKY: Using Testing as a Learning Tool, In: American Journal of Pharmaceutical Education, 2019 Nov;83(9):7324. doi: 10.5688/ajpe7324

Tiltott sáv mérnökség félvezető ötvözetekkel és önszerveződő alacsonydimenziós nanoszerkezetekkel

Ürmös Antal¹, Farkas Zoltán², Berecz Norbert^{3,4}, Nemcsics Ákos¹

¹Mikroelektronikai és Technológia Tanszék, Elektronikai és Kommunikációs Rendszerek Intézet, Óbudai Egyetem, Tavaszmező utca 17, H-1084 Budapest, Magyarország

²Természettudományi Tanszék, Elektrofizika Intézet, Óbudai Egyetem, Tavaszmező utca 17, H-1084 Budapest, Magyarország

³Környezetmérnöki és Természettudományi Intézet, Óbudai Egyetem, Doberdó út 6, H-1034 Budapest, Magyarország

⁴Anyagtudományok és Technológiák Doktori Iskola, Óbudai Egyetem, Népszínház u. 8, H-1081 Budapest, Magyarország

e-mail: urmos.antal@kvk.uni-obuda.hu, farkas.zoltan@kvk.uni-obuda.hu, berecz.norbert@uni-obuda.hu, nemcsics.akos@kvk.uni-obuda.hu

Absztrakt: Jelen dolgozatban a félvezetők sáv szerkezetének testreszabásával újfajta félvezető "anyagok" ezáltal újfajta eszközök készíthetők, illetve a hagyományos eszközök teljesítőképessége jelentős mértékben megnövelhető. A félvezetők tiltott sávjának megváltoztatásával az úgynevezett tiltott sáv mérnökség (angolul bandgap engineering vagy bandstructure engineering) területe foglalkozik. Ebben a cikkben áttekintjük a tiltott sáv mérnökség két módszerét, a félvezető ötvözetek alkalmazását és önszerveződő alacsonydimenziós nanoszerkezetek felhasználását.

Kulcsszavak: vegyület félvezető; bandgap ; tiltott sáv; GaAs; nanoszerkezet; csepp-epitaxia;

1 Bevezetés

A kondenzált anyagok fizikáját művelő kutatókat régóta foglalkoztatja az a kérdés, hogy miként lehet olyan anyagszerkezeteket előállítani mesterségesen, melyeknek adott, speciális alkalmazásokhoz szabott sáv szerkezete van [1]. Ez a kérdés azért érdekes, mert a sáv szerkezet testreszabása útján újfajta félvezető

eszközök készíthetők, illetve a hagyományos eszközök teljesítőképessége jelentős mértékben megnövelhető. Előbbire egy jó példa az ún. kvantumszámítógépek, míg utóbbira a nanoszerkezetekkel tartalmazó napelemek. Utóbbi példában konkrétan arról van szó, hogy a hagyományos Si-alapú napelemek kevesebb, mint 20%-os hatásfokát a III-V-ös vegyületfélvezetők (GaAs és rokon anyagai) növesztett nano-szerkezetekkel készült napelemek hatásfoka jelentősen meghaladhatja, ami akár 60-80% is lehet [2], [3], [4]. A 40% feletti változat már kereskedelmi forgalomban is kapható.

A félvezetők tiltott sávjának megváltoztatásával az úgynevezett tiltott sáv mérnökség (angolul bandgap engineering vagy bandstructure engineering) területe foglalkozik. A tiltott sáv mérnökséggel foglalkozó kutatóknak és más szakembereknek alapvetően háromféle módszere van a sávszerkezet testreszabására: 1. (vegyület)félvezető ötvözetekkel, 2. alacsonydimenziós félvezető nanoszerkezetekkel (ide tartoznak a félvezető szuperrácsok vagy félvezető heteroszerkezetek), 3. szerves molekulákkal.

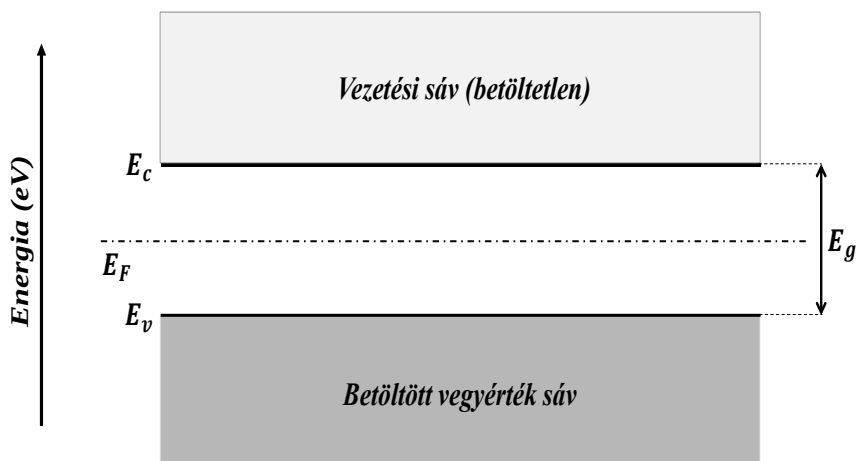
A tiltott sáv mérnökség legegyszerűbb módja a félvezető ötvözetek alkalmazása. Ebben az esetben egy széles tiltottsávú félvezetőt és egy keskeny tiltottsávú félvezetőt ötvöztünk ahhoz, hogy a kívánt köztes sáv szélességű anyagot kapjunk meg. A második módszer a mesterséges félvezető nanoszerkezetek felhasználása. Ebben az esetben különböző félvezető nano-szerkezetek nagyon vékony rétegeit növesztjük rá egymásra. A harmadik technika a szerves molekulák kategóriája, ahol szerves vagy szervetlen molekulák segítségével érjük el a kívánt fém-, félvezető- vagy a szupravezető tulajdonságokat.

Ebben a cikkben áttekintjük a tiltott sáv mérnökség első két módszerét, a félvezető ötvözetek alkalmazását és önszerveződő alacsony-dimenziós nano-szerkezetek felhasználását.

Az szerkezeti félvezetők sávszerkezetéről egy egyszerűsített kép a 1-1. ábrán látható. Az 1-1. ábrán az alsó, sötétszürke sáv az úgynevezett vegyérték sáv, ami $T \approx 0\text{K}$ hőmérsékleten teljesen be van töltve. Szintén a 1-1. ábrán a felső világosszürke sáv az úgynevezett vezetési sáv, ami $T \approx 0\text{K}$ hőmérsékleten teljesen üres. A két sáv között az úgynevezett tiltott sáv van. E tiltott sáv a vezetési sáv és a vegyértéksáv között helyezkedik el. A tiltott sáv E_g szélessége megegyezik a vezetési sáv minimuma és a vegyértéksáv maximuma közötti energiakülönbséggel, azaz $E_g = E_c - E_v$. Az E_F energia az úgynevezett intrinszc Fermi-szint. Ez a Fermi-szint szerkezeti félvezetők esetében a tiltott sáv közepén helyezkedik el. A Fermi-szint az az energiaszint, amely betöltési valószínűsége éppen 50%. Ez a szint intrinszik félvezetőkben a tiltott sáv közepén található, de ez függ az elektronok effektív tömegétől. Az effektív tömeg abból adódik, hogy az elektron periodikusan változó potenciáltérben mozog, emiatt az elektron tömege változik [5], [6].

A félvezetők állhatnak egyféle atomból, de többféle atomból is. Az egyféle atomot tartalmazó félvezetők az elemi félvezetők, míg a többféle atomból álló félvezetők a vegyületfélvezetők. A bináris (azaz két kémiai elemből álló) vegyületfélvezetők általános kémiai képlete $A^x B^y$, ahol az x az A komponens főcsoportjának a száma és az y a B komponens főcsoportjának a száma.

Ha az A egy trivalens elem (azaz a periódusos rendszer harmadik főcsoportjában van) és a B egy pentavalens elem (azaz a periódusos rendszer ötödik főcsoportjában van), akkor a vegyületfélvezető kémiai képlete $A^{III}B^V$. Ezeket vegyületfélvezetőket III-V-ös vegyületfélvezetőknél nevezünk. Ide tartozik például az indium-foszfid (InP), gallium-arsenid (GaAs), alumínium-antimonid (AlSb).



1-1. ábra.

A szerkezeti félvezetők sáv szerkezete, $T \approx 0K$ hőmérsékleten.

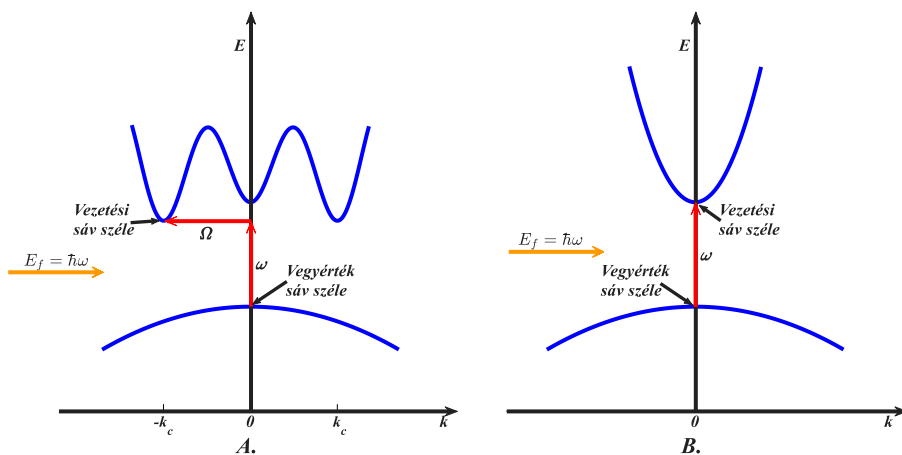
Ha az A egy divalens elem (azaz a periódusos rendszer második főcsoportjában van) és a B egy hexavalens elem (azaz a periódusos rendszer hatodik főcsoportjában van), akkor a vegyületfélvezető kémiai képlete $A^{II}B^{VI}$. Ezeket vegyületfélvezetőket II-VI-ös vegyületfélvezetőknél nevezünk. Ide tartozik például az cink-szulfid (ZnS), kadmium-szelenid (CdSe). Vannak olyan vegyületfélvezetők is, ahol mindkét elem a negyedik főcsoportban van $A^{IV}B^{IV}$. Ilyen vegyületfélvezető például a szilícium-karbid (SiC). A szilícium (Si) és a germánium (Ge) egy komponensből álló félvezetők, melyeket elemi félvezetőknek nevezünk. A félvezetőknek lehet indirekt sáv szerkezete és direkt sáv szerkezete is. Ez a két sáv szerkezet típus a 1-2. ábrán látható.

A 1-2/A. ábrán jól látható, hogy a vezetési sáv minimuma és a vegyértéksáv maximuma nem ugyanannál a hullámszámnál van, indirekt sáv szerkezet esetében.

Emiatt, ha az ilyen napelemre rásüt a nap, akkor az ω frekvenciájú foton energiája egyrészt E_g energiájú elektron-lyuk párt generál, másrészt a kristálysírnak is energiát ad át, azaz $\hbar\Omega$ energiájú és Ω frekvenciájú rácsrezgés (azaz fonon)

keletkezik. Emiatt a $\hbar\Omega$ energiátöbblet miatt a napelem melegedni fog. Indirekt sávszerkezetű félvezető anyag például a szilícium (Si), germánium (Ge), gallium-foszfid (GaP) illetve az alumínium-antimon (AlSb) is. Indirekt sávszerkezetű félvezető anyagnál az energiamérleg $E_f = \hbar\omega = E_g + \hbar\Omega$ lesz [7].

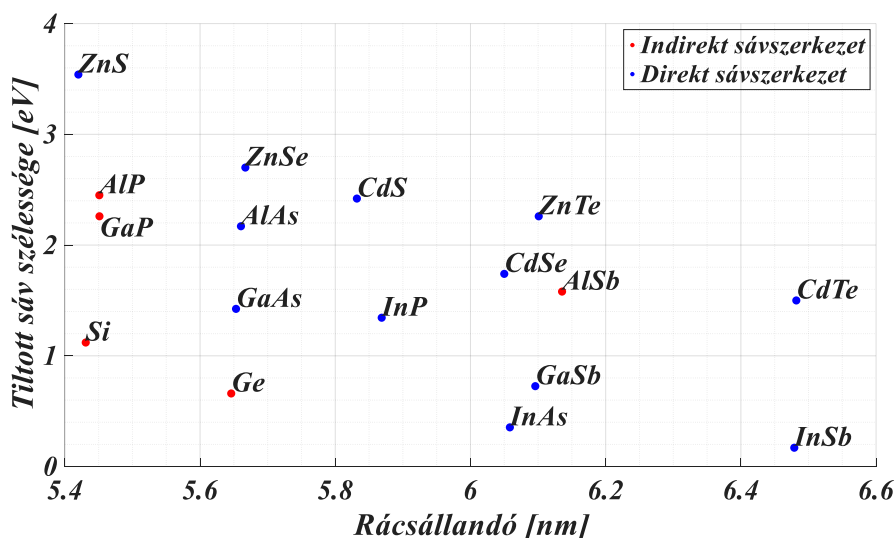
A direkt sávszerkezet a 1-2/B. ábrán található. Ebben az esetben a vezetési sáv minimuma és a vegyértéksáv maximuma ugyanannál a hullámszámnál van. Ennek következtében, ha a direkt sávszerkezetű napelemre rásüt a nap, akkor az ω frekvenciájú foton energiája teljes egészében E_g energiájú elektron-lyuk párt generál, így az energiamérleg $E_f = \hbar\omega = E_g$ lesz [7]. Direkt sávszerkezetű félvezető anyag például az indium-foszfid (InP), gallium-arszenid (GaAs), ólom-szulfid (PbS) illetve a kadmium-szelenid (CdSe) is.



1-2. ábra.

A félvezetők sávszerkezete egyaránt lehet indirekt (A.) és direkt (B.) is.

Az 1-3. ábrán a néhány fontos vegyületfélvezető tiltott sávja látható, a rácsállandó függvényében.



1-3. ábra.

Néhány fontos félvezető anyag tilossávja, a rácsállandó függvényében.

2 Félvezető rétegszerkezetek

A tiltotsáv megváltoztatásának legegyszerűbb módja a háromkomponensű (ternary) rétegszerkezetek növesztése, például (Hg,Cd)Te vagy (Ga,Al)As [1].

A háromkomponensű ötvözetek általános képlete: $A_xB_{(1-x)}C$ [8]. Ezek az ötvözetek háromféle atomból állnak, az A, a B és C típusú atomokból. Az A atom és a B atom egyaránt tartozhat a III. főcsoportba vagy a V. főcsoportba. Az A atomok és a B atomok aránya $x:(1-x)$. Ez az x arány az úgynevezett sztöchiometriai arány, amit az $0 < x < 1$ tartományban értelmezünk. Ebből a feltételezésből kiindulva az sáv szerkezetét az átlagos rácsparaméter és az átlagos pszeudopotenciál alapján, valamint az $x:(1-x)$ arányból kiindulva tudjuk számolni. Ez a módszer az úgynevezett virtuális kristály közelítés. Ez a közelítés feltételezi, hogy az A atomok és a B atomok eloszlása $x:(1-x)$ arányban egyenletes, a C kation környezetében [8].

A háromkomponensű vegyületfélvezetőkre jó példa a higany-kadmium-tellurid $Hg_xCd_{(1-x)}Te$ és az alumínium-gallium-arsenid $Al_xGa_{(1-x)}As$ is.

A higany-kadmium-telluridnak $\text{Hg}_x\text{Cd}_{(1-x)}\text{Te}$ infravörös szenzorok készítésénél van nagy jelentősége [1]. Ezek az anyagszerkezetek lefedik a 10 μm -es ($x = 0.2$, $E_g \approx 100$ meV) és az 5 μm -es ($x = 0.3$, $E_g \approx 200$ meV) atmoszferikus ablakokat. Ezek az „atmoszferikus ablakok” olyan hullámhossz tartományok, ahol a légkör nem nyeli el az elektromágneses sugárzást olyan mértékben, mint más hullámhosszokon. A 10 μm -es hullámhossz tartomány több ~ 300 K hőmérsékletű dolog csúcs hőkibocsátását is tartalmazza, így számos orvosi (hőképfalkotás), meteorológiai és más alkalmazás is létezik. A kipufogós és a sugárhajtóművek pontosan az 5 μm -es tartományban bocsátanak ki elektromágneses sugarakat, így könnyen elképzelhető a $\text{Hg}_x\text{Cd}_{(1-x)}\text{Te}$ katonai alkalmazása is (ebben az esetben $x = 0.3$) [1].

Az alumínium-gallium-arzenid $\text{Al}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{As}$ technológiai szempontból nagyon fontos, mert a gallium-arzenid (GaAs) és az alumínium-arzenid (AlAs) ötvözeténél a rácsparaméter a teljes összetétel tartományban $0 < x < 1$ csak kicsit változik. Ebből az következik, hogy nagyon jó minőségű vékonyrétegeket készíthetünk ezzel a két anyaggal. A $\text{Al}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{As}$ tiltott sávja a ($0 \leq x \leq 0,35$) tartományban direkt sávszerkezetű, míg az ($0,35 \leq x \leq 1$) tartományban már indirekt sávszerkezetű [1].

Nem ritka az sem, hogy nem három, hanem négy vagy akár öt elemből álló vegyületfélvezetőket állítanak elő azzal a céllal, hogy adott tulajdonságú anyagokat tervezzenek.

A négykomponensű (quaternary) vegyületfélvezetők többféle felépítése lehetséges [9]. Egyik – a leggyakrabban alkalmazott – lehetőség az, hogy két III-as főcsoportba tartozó elem és két V-ös főcsoportba tartozó elem. Másik lehetőség az egy III-as főcsoportba tartozó elem és három V-ös főcsoportba tartozó elem. Harmadik lehetőség az három III-as főcsoportba tartozó elem és egy V-ös főcsoportba tartozó elem. Alapvetően a négykomponensű vegyületfélvezetőknél adott rácsparaméterrel sokkal rugalmasabban létrehozhatjuk a kívánt tiltott sávú és sáveltolású vegyületfélvezetőt. A megoldás hátránya, hogy gyakran nagyobb a bizonytalanság, különösen akkor, ha a négykomponensű vegyületfélvezetőknél az V. csoport elemeit keverjük össze [9].

A négykomponensű III-V-ös vegyületfélvezető ötvözetek alkalmazására egy jó példa Nádas et. al. [10] kutatása. Ebben a kutatásban a szerzők gallium-indium-arzén-foszfid (GaInAsP) vékonyréteg LED-eket növesztettek, indium-foszfid (InP) hordozón. Ezek a LED-eknek emissziós hullámhossza 900 nm és 1700 nm tartományban hangolható. A LED-eket a kutatók folyadékfázisú epitaxiával (LPE) növesztették, mely lehetővé tette a rétegvastagság és összetétel precíz szabályozását. A LED-ek legalább két GaInAsP infravörös fényt kibocsátó réteget tartalmaztak, amelyek közül az egyik elektromosan, míg a másik optikailag volt gerjesztett. Ez a fajta LED a foszfor konverziós fehér LED szerkezetekhez hasonlóan működik, ugyanakkor elődjéhez képest kompaktabb és stabilabb.

Ennek az az oka, hogy az összes réteg szinte rácsszerűen illeszkedik az InP hordozóhoz és a fénykibocsátó rétegek nagyon közel helyezkednek el egymáshoz. A LED szerkezeteket a kutatók úgy optimalizálták, hogy a hosszú, közepes és rövid közeli infravörös (NIR) tartományban működjenek. Az ebben a munkában ismertetett LED-szerkezetek alacsony költségűek, kis méretűek és nagy a hatékonyságuk. Ennek köszönhetően számos alkalmazási területen alkalmazhatók, beleértve az élelmiszeripari minőségellenőrzést és a klinikai diagnosztikát is [10].

3 Alacsonydimenziós félvezető nano-szerkezetek

A tiltott sáv megváltoztatásának egy másik módja az alacsonydimenziós félvezető nanoszerkezetek alkalmazása.

Ezeket az alacsonydimenziós félvezető nanoszerkezeteket többféle módon elő lehet állítani. Egyik lehetőség elektronsugár-litográfia, rétegleválasztási technológiával és más speciális megmunkálási módszerekkel [11]. Másik lehetőség a nano-szerkezetek gyártására az önszerveződés jelenségének kihasználása, epitaxiás módon.

Az epitaxia görög eredetű kifejezés, ami az *epi-* („azonos”) és a *taxis* („mintázat, textúra”) szavakból származik [12]. A különféle epitaxiás eljárások közül a legsokoldalúbb és a legkönnyebben szabályozható technika, a molekulásugár epitaxia (molecular-beam epitaxy (MBE)) [13] [14]. További előnye a módszernek, hogy a molekulásugár precízen irányítható, és a környezeti feltételek is pontosan beállíthatók. Az eljárás működésének a lényege, hogy atomi vagy molekulásugarat irányítunk ultranagyvákuum (UHV) környezetben egy fűthető mintatartóra. Az atomok a minta felületén kondenzálódnak. Az atomok, molekulák leválasztása nagytisztaságú, nagyvákuum (ultra high vacuum (UHV)) térben történik (kb. 10^{-9} Torr nyomás alatt).

A molekulásugár epitaxiával többféle úton növeszthetünk nano-szerkezeteket. Egyik ilyen módszer a feszültség indukált módszer [15] [16] [17], ahol a két egymástól különböző anyag rácállandójának eltérése miatt a vékonyrétegben mechanikai feszültség keletkezik, így kvantumpontok alakulnak ki. A másik módszernek négy változata van: Frank Van-Der Merve növekedés, Stransky-Krastanov növekedés és a Volmer-Weber növekedés, illetve az 1990-es évek elején felfedezett csepp-epitaxia [18] [19] [20] [21] [22]. Egy jó áttekintés a molekulásugár epitaxiás önszerveződő rétegnövesztés módszereiről a [23] tanulmány.

Megjegyzendő, hogy a feszültség-indukált növesztéssel, a Frank Van-Der Merve módszerrel, Stransky-Krastanov módszerrel és a Volmer-Weber módszerrel csak kvantum-pontok növeszthetők. Ezzel szemben a csepp-epitaxiával kvantum-pontok, kvantum-gyűrűk, dupla kvantum-gyűrűk, nano-lyukak, illetve invertált

kvantum- pontok¹ is egyaránt növeszthetők. Így a csepp-epitaxia egy ígéretes technológia a nano-elektronikai eszközök gyártására [24].

A nano-szerkezetek növesztése esetén fontos, hogy atomi szempontból sima legyen a felület. Ezt a célt egy buffer réteg növesztésével érik el, ami ugyanabból az anyagból van mint a hordozó [1], [25].

Az önszerveződés során a rendszer egyes alkotó elemei önmaguktól rendezett szerkezetbe vagy mintázatba szerveződnek, kizárólag az alkotó elemek közötti kölcsönhatások (az ún. kormányzó erők) miatt, külső hatások nélkül. Ilyen kormányzó erő például az energiaminimumra való törekvés, a felületi feszültség és az Ostwald-érés (Ostwald-ripening) is.

Az „alacsony dimenziós” kifejezés azt jelenti, hogy az adott szerkezet nem 3 dimenziós (test), hanem 2 (felület), 1 (vonal) vagy 0 (pont) dimenziós. Ugyanezt másképpen kifejezve, az elektron mozgása egy vagy több irányban be van határolva, azaz ezekben az irányokban az elektron nem mozoghat.

Precízebben fogalmazva, a kvantum behatárolás azt jelenti, hogy az adott elektront egy olyan méretű térrészbe zárjuk be, ami összevethető az elektronok karakterisztikus (azaz az adott objektumra leginkább jellemző) méreteivel [26] [27] [28]. Ilyen karakterisztikus méret például az elektronok de-Broglie hullámhossza, közepes szabad úthossz, diffúziós hossz, árnyékolási hossz és a lokalizációs hossz. Az elektronoknak, melyek ebben az alacsony-dimenziós rendszerekben vannak, újszerű és érdekes tulajdonságai vannak. Ezek az új transzport tulajdonságok a kvantummechanika segítségével érthetők meg. Ebben a cikkben a karakterisztikus méretek közül csak a de-Broglie hullámhosszról és a Bohr sugárról lesz szó. A többi karakterisztikus méretről a szakirodalomban, a [27] [28] fejezetekben lesz szó.

A részecske-hullám dualitás de-Broglie féle elmélete szerint az elektron az ilyen szerkezetekben hullámszerű tulajdonságot mutat. A nano-szerkezeteket annak alapján osztályozzuk, hogy hány irányban van behatárolva egy olyan méretű térrészbe, ami összevethető az elektron de-Broglie hullámhosszával.

A kvantumbehatárolásnak három tartománya, azaz három típusa van: az erős kvantumbehatárolás tartománya, közbülső kvantumbehatárolás tartománya és a gyenge kvantumbehatárolás tartománya. Az adott nanoszerkezet attól függően tartozik a kvantumbehatárolás adott tartományába, hogy a rendszer d_c mérete milyen viszonyban van az a_{0eh} Bohr sugárral. E három tartomány rövid összefoglalása az 1. táblázatban látható.

¹ Az invertált kvantum pont egy olyan nanolyuk, amit a hordozó anyagához képest eltérő anyaggal van feltöltve.

1. táblázat.

A kvantumbehatárolás három típusának összefoglalása (forrás: [27]).

<i>A kvantumbehatárolás tartománya</i>	<i>A d_c méret és az a_{0eh} Bohr sugár viszonya</i>
erős kvantumbehatárolás	$d_c < a_{0eh}$
közbülső kvantumbehatárolás	$d_c \sim a_{0eh}$
a gyenge kvantumbehatárolás	$d_c > a_{0eh}$

Az erős kvantumbehatárolás tartományában az elektron és a lyuk közötti elektrosztatikus erőből származó elektrosztatikus energia sokkal kisebb a kvantum behatárolás energiájához képest. Ennek eredményeképpen az exciton az alkotóelemeitől függetlenül vizsgálható [27]. A közbülső kvantumbehatárolás tartományában az elektron és a lyuk mozgását a Coulomb vonzás erős mértékben korrelálja. Ennek eredményeképpen az exciton energiaszintjeit egyrészt a Coulomb kölcsönhatás határozza meg, másrészt az exciton hullámfüggvényének határfeltételei szabják meg. A gyenge kvantumbehatárolás tartományában az exciton tömegközéppontja határozza meg az energiaspektrumot, a sokkal erősebb elektron-lyuk Coulomb kölcsönhatásnak köszönhetően.

A vegyületfélvezető hordozón növeszthető alacsony dimenziós nano-szerkezetek összefoglalása például, a 2. táblázatban látható. Ebben a táblázatban a szabadsági fok azoknak a térbeli irányoknak a száma, ahol az elektron mozoghat.

2. táblázat.

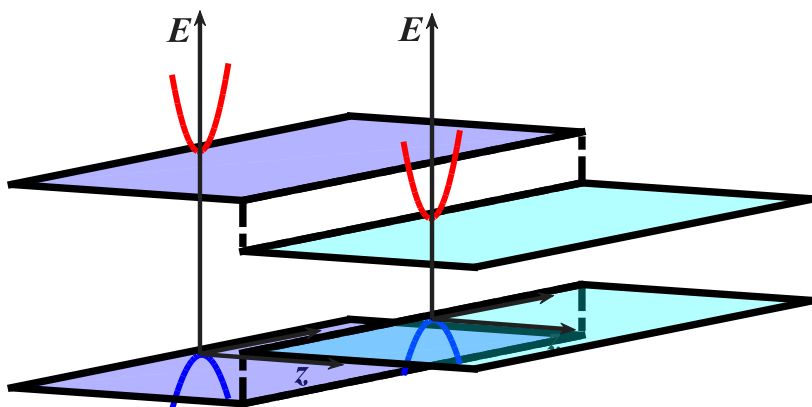
A vegyületfélvezető hordozón növeszthető alacsony dimenziós nanoszerkezetek összefoglalása például.

<i>Szabadsági fokok száma</i>	<i>Kvantumbehatárolás ennyi irányban</i>	<i>Példák a nanoszerkezetekre</i>
3 (test)	0	-
2 (felület)	1	kvantum völgyek
1 (vonal)	2	nanohuzal, nanocső
0 (pont)	3	kvantum pont, kvantum gyűrű (dupla kvantum gyűrű), nanokristályok, nanolyukak (invertált kvantum pontok)

A nanoszerkezetek különféle típusainak részletes osztályozása V.V. Pokropivny et. al. [29] cikkében található meg.

3.1 Kétdimenziós rendszerek

Ha két különböző tömbi kristályt egymás mellé helyezünk, akkor egy úgynevezett heteroátmenetet kapunk. A heteroátmenetknél a két anyag tiltott sávja különböző. A 3.1-1. ábrán látható, hogy a két különböző tiltott sávú félvezető anyag, egymás mellett heteroátmenetet alkot, a fekete színű görbék az elektron határfelülettel párhuzamos, korlátlan mozgási tartományát reprezentálják. A szakadás a két anyag vezetési sávja és a vegyérték sávja között egy konstans potenciál taggal vannak az ábrán reprezentálva.



3.1-1. ábra.

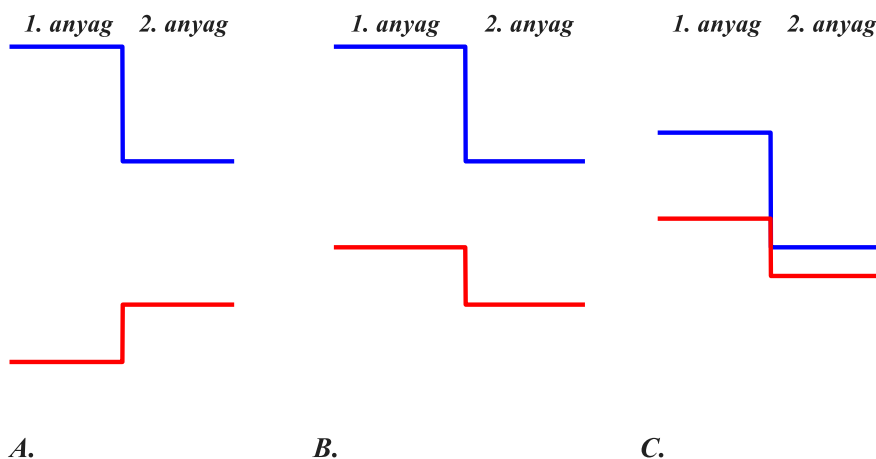
Két különböző tiltott sávú félvezető anyag, egymás mellett heteroátmenetet alkot; a fekete színű görbék az elektron határfelülettel párhuzamos, korlátlan mozgási tartományát reprezentálják (forrás: [30]).

A hetero átmenet a vegyértéksáv és a vezetési sáv egymáshoz képesti helyzetnek megfelelően lehet I-es II-es vagy III-as típusú. Ez a három típus a 3.1-2. ábrán látható. A 3.1-2/A. ábrán az I-es típusú heteroátmenet látható, a 3.1-2/B. ábrán az II-es típusú heteroátmenet látható, míg a 3.1-2/C. ábrán az III-as típusú heteroátmenet látható. A heteroátmenet típusa az elektronaffinitástól függ. A kék vonal a vezetési sáv széle, míg a piros vonal a vegyérték sáv széle. Az 1. számú anyag a szélesebb tiltott sávú anyagot reprezentálja, míg a 2. számú anyag a keskenyebb tiltott sávú anyagot képviseli.

Ha ebből a heteroátmenetből többet egymás mellé teszünk, akkor heteroszerkezetet kapunk [30]. A heteroszerkezeteknek nagyon sok változata létezik. Ha a keskeny tiltott sávú anyagból szendvicsszerűen egy „B”-vel jelölt vékony réteget teszünk két „A”-val jelölt szélesebb tiltott sávú anyag közé, akkor egy dupla heteroátmenetet, azaz egy heteroszerkezetet kapunk. Erre a dupla heteroátmenetre a 3.1-3. ábrán látunk példát. Ha az „B”-vel jelölt vékony réteg

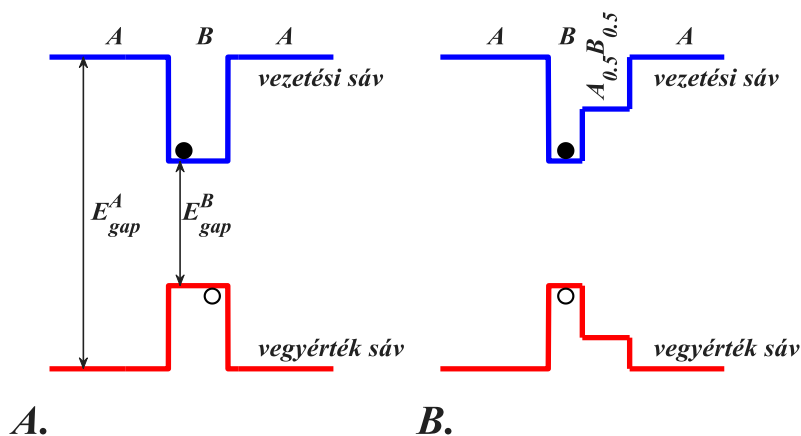
elég vékony ahhoz, hogy a kvantumtulajdonságok megjelenjenek, akkor az ilyen sávelrendezést kvantumvölgynek nevezzük (3.1-3/A. ábra) [30], [31].

Ha a rendszerben olyan töltéshordozók vannak, melyek az szerkezeti vagy adalékolt félvezetőben termikusan aktiváltak, akkor ezek a töltéshordozók megpróbálják csökkenteni az energiájukat. Ebben a példában a 3.1-3. ábrán az elektronokat a fekete körök jelképezik, míg a lyukakat az üres körök szimbolizálják. Ha a heteroszerkezethez további félvezető réteget adunk, akkor lépcsős, másnéven aszimmetrikus kvantumvölgy alakul ki (3.1-3/B. ábra). Az 1. anyag a széles tiltotsávú anyag, míg a 2. anyag a keskeny tiltotsávú anyag. Az elektronaffinitástól függ, hogy adott heteroátmenet esetén melyik átmenet típus alakul ki [30], [31], [32].



3.1-2. ábra.

A hetero átmenetek típusai. I-es típusú heteroátmenet (A.), II-es típusú heteroátmenet (B.), III-as típusú heteroátmenet (C.) (forrás: [30]).



3.1-3. ábra.

Az egydimenziós $V(z)$ potenciálok a vezetési sávban és a vegyértéksávban, ahol az baloldalon egy kvantum völgy látható (A.), míg a jobboldalon egy lépcsős kvantum völgy (B.) található. A piros vonal a vegyértéksáv széle, a kék vonal a vezetési sáv széle (forrás: [30]). Mindkét részabrában az üres körök a lyukak és a fekete betöltött körök az elektronok.

Léteznek még összetettebb heteroszerkezetek is, például dupla kvantum völgyek, a többszörös kvantum völgyek, és a szuperrácsok. A többszörös kvantumvölgy és a szuperrács között a különbséget a kvantumvölgyek közötti kölcsönhatás mértéke szabja meg. A többszörös kvantumvölgyek esetében az kvantumvölgyek egymástól el vannak különítve és nincsenek egymással kölcsönhatásban. A szuperrácsban a kvantumvölgyek egymással kölcsönhatásba lépnek [30].

Ezeknek a heteroszerkezeteknek különleges elektronikus és optikai tulajdonságaik vannak.

Talán a leginkább összetett heteroszerkezet az úgynevezett CHIRP² szuperrács, mely egyik felhasználása egy negatív differenciális ellenállású elem [33]. Ez a CHIRP szuperrács alapú eszköz nem érzékeny sem zavarra, sem az elektronok nemkívánatos szóródására. Egy másik jó példa a CHIRP szuperrács alkalmazására a közép-infravörös tartományban működő kvantum-kaszád lézer [34] [35]. A harmadik, közelmúltban ismertetett példa egy AlGaIn heteroszerkezetű, mély ultraibolya frekvenciatartományban működő fénykibocsátó dióda [36].

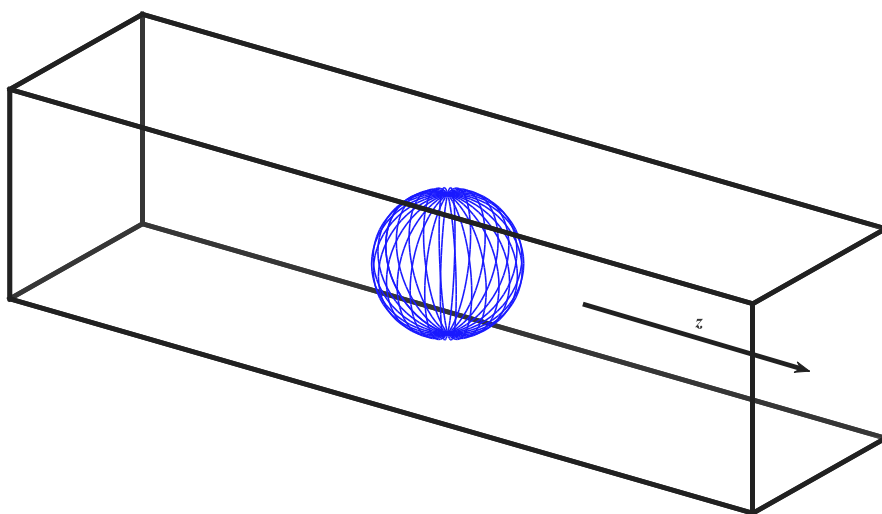
A többszörös kvantum völgyes nanoszerkezetekkel napelemek is készíthetők, melyek hatásfoka akár 40-60% is lehet. Ezen napelemek alkalmazására jó példa a magyar fejlesztésű 5 cm x 5cm x 5cm méretű SMOG-P PocketCube zsebműhold energiaellátása [37], [38], [39], ami működése során, várakozáson felül teljesített

² Coherent Hetero-Interfaces for Reflection and Penetration (CHIRP): Koherens hetero-interfészek a tükrözéshez és a behatoláshoz.

[40]. Az elektromos energiát a GaAs-alapú kvantumvölgyes (InGaP/GaAs/Ge heteroátmeneteket tartalmazó) *TJ Solar Cell 3G30C* típusú napelemek szolgáltatták. A zsebműhold feladata a Föld körüli pályán az elektroszmog mérése volt, azaz a Föld rádiófrekvenciás környezetének vizsgálata a 470–800 MHz-es frekvenciasávban. Az adatgyűjtésen kívül nagyon fontos volt a műhold oktatási szerepe is, hiszen oktatói irányítással a hallgatók tervezték. Érdekesség, hogy a SMOG-P a fellövés után azonnal működni kezdett, míg a vele együtt fellőtt többi műhold nem szólalt meg. A szakemberek valószínűsítik, hogy azért történt ez, mert a többi műhold energiaellátása nem volt megfelelő [39], [40].

3.2 Egydimenziós rendszerek

Az egydimenziós rendszerek közé tartoznak például a nanocsövek és a kvantum huzalok is. Ezekben az egydimenziós rendszerekben az elektronok csak egy dimenzióban tudnak mozogni [26]. A 3.2-1. ábrán az elektron mozgása látható, egydimenziós kvantumrendszerben.



3.2-1. ábra.

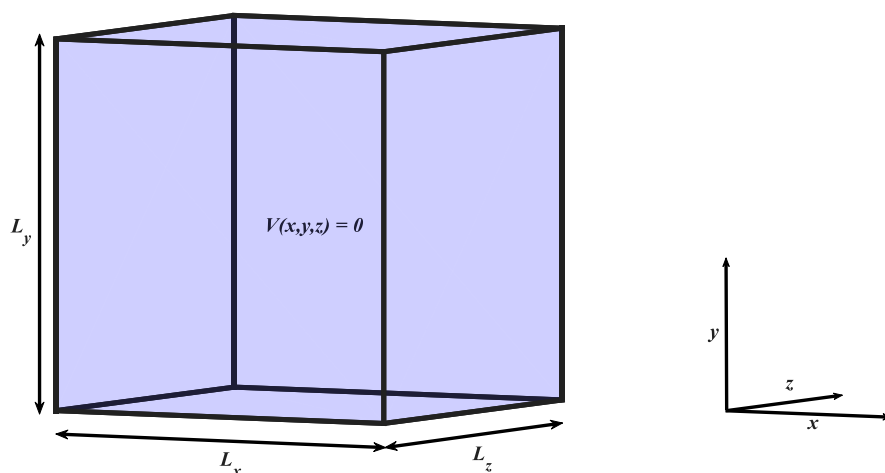
Az elektron mozgása egydimenziós kvantumrendszerben.

3.3 Nulladimenziós rendszerek

A nulladimenziós rendszereknél az elektron mozgása mindhárom irányban behatárolt [26] [41] [28]. Ez a további kvantumbehatárolás a harmadik

irányban is megszünteti az elektron mozgásának lehetőségét, így az elektron mindhárom dimenzióban lokalizált lesz. Így a nulladimenziós rendszerek energiaszintjeit alszinteknek nevezik. A nulladimenziós rendszereket mesterséges atomnak is nevezik.

Ezeknek a rendszereknek több fajtája van. Egyik idealizált forma a kocka formájú kvantum pont, ami a 3.3-1. ábrán látható. Ennek a kvantum pontnak az x irányú hossza L_x , y irányú hossza L_y és z irányú hossza L_z .



3.3-1. ábra.

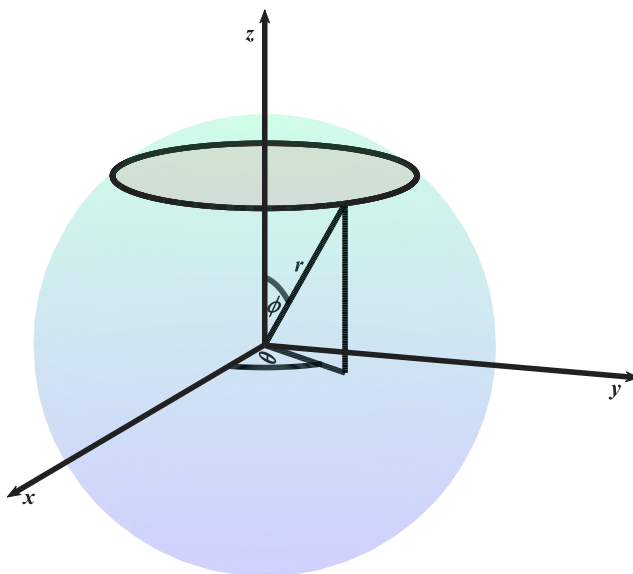
Kocka formájú kvantum pont, mely oldalainak hossza x irányban L_x , y irányban L_y és z irányban L_z (forrás: [26]).

A kvantum pont másik idealizált leírása gömb alakú (3.3-2. ábra). A gömb sugara r , θ az iránysszög és ϕ az emelkedési szög. Gömb alakú potenciál esetében a szög a gömb körül periodikusan változik.

A kocka és a gömb alakon kívül az idealizált kvantum-pont lehet piramis alakú [42], de más szabályos analitikusan leírható alak is elképzelhető [41]. A valóságban szinte tetszőleges alakú kvantumpontok (kvantum-gyűrűk, dupla kvantum-gyűrűk, nano-lyukak, invertált kvantum-pontok) állíthatók elő a korábban már megemlített csepp epitaxiás módszerrel.

Ezekből a kvantumpontokból a félvezetők tiltott sávjában egy úgynevezett köztes sávot alakíthatunk ki. Jó példa a köztes sáv alkalmazására az IBQD napelem. A 3.3-3. ábrán az IBQD napelem sávdigramja látható [43], ahol az E_g a tiltott sáv, az E_L és az E_H al-tiltott sávok. A fehér színű körök a lyukak, míg a kék színű körök a gerjesztett elektronok. A CB QFL a vezetési sáv (angolul: conduction

band (CB)) kvázi Fermi-szintje (Quasi Fermi Level (QFL)), míg a VB QFL a vegyérték sáv (valence band (VB)) kvázi Fermi-szintje. Az IB QFL az úgynevezett köztes sáv (intermediate band) kvázi-Fermi szintje. A 3.3-3. ábrán elmondott okok miatt az IBQD napelem – összehasonlítva a hagyományos napelemekkel – nemcsak a (1)-es energiájú fotonokat, hanem az (2)-es és a (3)-as energiájú fotonokat is el tudja nyelni. Ezt úgy is kifejezhetjük, hogy a köztes sávban lévő kvantum-pontoknak köszönhetően extra abszorpciós csatornák jelennek meg a tiltott sávban, a vezetési sáv és a vegyérték sáv között [44].



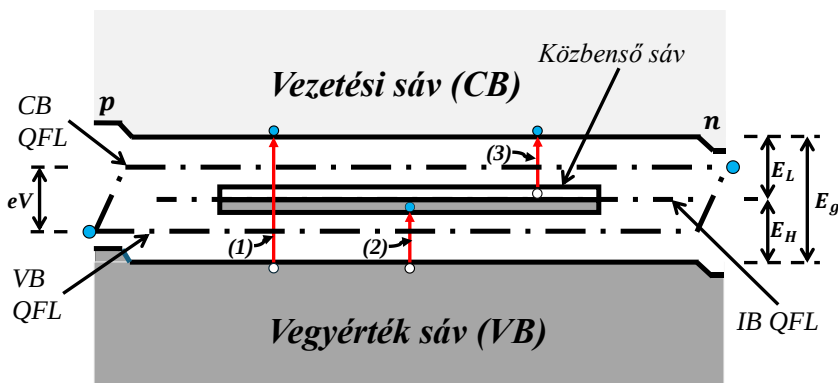
3.3-2. ábra.

Gömb alakú kvantum pont (forrás: [26]).

A köztes sáv alkalmazásának egyik hátránya az, hogy miután nagyszámú elektron került oda, a további átmeneteket a végső állapot betöltési tényezője blokkolja [44]. Ennek a blokkolásnak következtében a töltéshordozók egy része gyorsan relaxálódik [44], anélkül, hogy elnyelne fotont [45]. Ezt a blokkolást a 3.3-4. ábrán látható, úgynevezett racsn³ sáv (ratchet band) segítségével oldhatjuk fel [45], [46], [47]. A racsn sáv lényegében egy gyűjtő tartály azon töltéshordozók számára, melyek a köztes sávból gyorsan relaxálnak. A gyors relaxáció azt jelenti,

³ Magyarul kilincsmű vagy rögzítő kilincses fogaskerék, ami egy olyan mechanikus szerkezet, amely lehetővé teszi a forgást egy irányban, de megakadályozza a visszafelé mozgást.

hogy a köztes sáv közel üres marad, míg a racsnisáv majdnem tele van. A ΔE energiakülönbség a racsnisáv és a köztes sáv között egyaránt kisebb a tiltotsáv szélességénél, illetve a $k_B T$ energiakülönbségnél is. Utóbbi feltétel segítségével megelőzhető, hogy a töltéshordozó termikus úton visszajusson a köztes sávba [44].

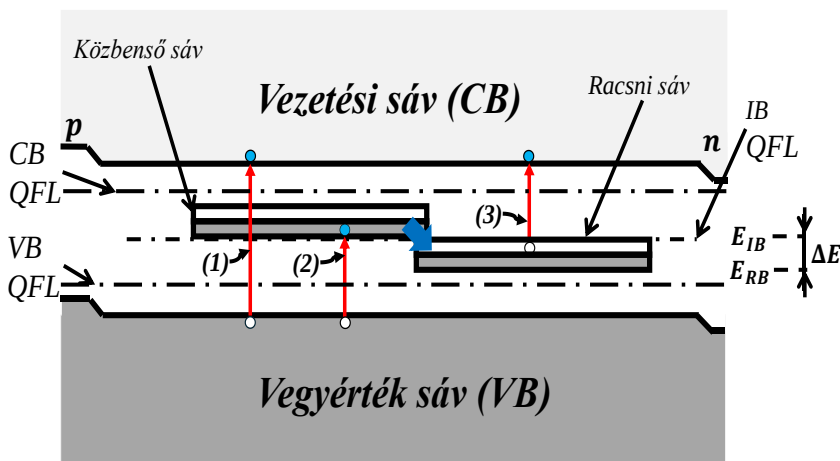


3.3-3. ábra.

Az IBQD napelem sávdigramja, ahol az E_g a tiltott sáv, az E_L és az E_H al-tiltott sávok. A CB QFL a vezetési sáv kvázi Fermi-szintje, míg a VB QFL a vegyérték sáv kvázi Fermi-szintje. Az (2) és a (3) jelölések a tiltott sáv alatti, míg a (1) a tiltott sáv feletti foton abszorpciót reprezentálja (forrás: [43]).

A racsnisáv a köztes sáv alatt, egy ΔE energiaintervallumban található. Ez a ΔE energiaintervallum a köztes sáv energiájának és racsnisáv energiájának a különbsége ($\Delta E = E_{IB} - E_{RB}$). Feltételezzük, hogy az köztes sáv és az racsnisáv közötti termikus átmenet olyan gyors, hogy mindkét sáv betöltése egyetlen kvázi Fermi-szinttel leírható. A köztes sávban lévő töltéshordozók gyorsan az racsnisávba kerülnek, ahol hosszú lehet az élettartamuk. Ennek az az oka, hogy a racsnisáv és a vegyértéksáv optikai szempontból izolált.

A köztes sávnak és a racsnisávnak köszönhetően a kvantumpontot tartalmazó napelem a napsugárzás spektrumából egy szélesebb tartományt tud abszorbeálni, így a η hatásfoka 60-80% is lehet, összehasonlítva a hagyományos PN átmenetes szilícium alapú napelemekkel ($\eta \leq 20\%$) vagy gallium-arszenid alapú napelemekkel ($\eta \leq 30\%$). Megjegyzendő, hogy a gyakorlatban kvantum pontok vagy kvantumvölgyek alkalmazása nélkül, pusztán PN átmenetes napelemekkel termodinamikai okokból a maximális hatásfok nem lépheti át a 30%-ot [48]. Ez az úgynevezett Shockley–Queisser limit [49].



3.3-4. ábra.

A racsnis sávú IBQD napelem sávdiaagramja (forrás: [45]).

A másik példa a kvantumpontok alkalmazására a kvantum-sejtautomaták egyik tervezett megvalósítása, az úgynevezett kvantumpont sejtautomata (Quantum-dot Cellular Automata (QCA)) [50], [51]. Ennek az elektronikus eszköznek alapkonceptióját Tougaw és Lent dolgozta ki [52], 1993-ban. A kvantumpontok töltés tárolók, diszkrét energia állapotai vannak (több mint kettő állapota van, de csak két állapotot használt), emiatt ezeket néha mesterséges atomoknak is hívják [21].

Források

- [1] John Singleton, „Bandstructure Engineering”, in *Band Theory and Electronic Properties of Solids*, köt. 51, Oxford University Press, 2001, o. 65–82.
- [2] Nemcsics Ákos, *A napelem működése, fajtái és alkalmazása*. Budapest: Óbudai Egyetem, Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar, 2013.
- [3] Nemcsics Ákos, „III-V-based Low-dimensional Structures”. Óbudai Egyetem, Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar, 2011. [Online]. Elérhető: https://real-d.mtak.hu/498/1/Nemcsics_Akos_tezisek.pdf
- [4] Ürmös Antal, „III-V-alapú kvantumpontokat tartalmazó napelemek néhány technológiai aspektusa”. Óbudai Egyetem, 2018. [Online]. Elérhető: https://lib.uni-obuda.hu/sites/lib.uni-obuda.hu/files/Urmos_Antal_ertekezes.pdf

- [5] Charles Kittel, „Energy Bands”, in *Introduction to Solid State Physics*, 8. kiad., New Jersey, USA: John Wiley and Sons, 2018, o. 163–185.
- [6] Prabir K. Basu és Hrishikesh Dhasmana, „Band Theory”, in *Solid State Engineering Physics*, 2. kiad., Springer, 2023, o. 81–108. [Online]. Elérhető: <https://doi.org/10.1007/978-3-031-10940-9>
- [7] Charles Kittel, „Semiconductor crystals”, in *Introduction to Solid State Physics*, 8. kiad., New Jersey, USA: John Wiley and Sons, 2018, o. 189–224.
- [8] Chihiro Hamaguchi, „Electron–Phonon Interaction and Electron Transport”, in *Basic Semiconductor Physics*, Cham: Springer International Publishing, 2023, o. 273–374. doi: 10.1007/978-3-031-25511-3_6.
- [9] Igor Vurgaftman, Jerry R. Meyer, és Matthew P. Lumb, „Alloys and Exotic Materials”, in *Bands and Photons in III-V Semiconductor Quantum Structures*, OUP Oxford, 2020, o. 197–225.
- [10] Nádas József, „LED-ek sávszélesítése közeli infravörös spektroszkópiái és világítástechnikai alkalmazásokban”. Óbudai Egyetem, 2025. [Online]. Elérhető: https://lib.uni-obuda.hu/sites/lib.uni-obuda.hu/files/Nadas_Jozsef_ertekezes.pdf
- [11] G. Cao és Y. Wang, „Nanostructures Fabricated by Physical Techniques”, in *Nanostructures and Nanomaterials*, 2nd kiad., WORLD SCIENTIFIC, 2011. doi: 10.1142/7885.
- [12] Marian A. Herman, Wolfgang Richter, és Helmut Sitter, *Epitaxy Physical Principles and Technical Implementation*. in Springer Series in Materials Science, no. 62. Springer Berlin, Heidelberg, 2010. [Online]. Elérhető: <https://doi.org/10.1007/978-3-662-07064-2>
- [13] Marian A. Herman és Helmut Sitter, *Molecular Beam Epitaxy, Fundamentals and Current Status*, 2. kiad. in Springer Series in Materials Science. Berlin: Springer Berlin, Heidelberg, 1996. [Online]. Elérhető: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-80060-3>
- [14] Mohamed Henini, Szerk., *Molecular Beam Epitaxy: From Research to Mass Production*, 2. kiad. Elsevier Science, 2018. [Online]. Elérhető: <https://shop.elsevier.com/books/molecular-beam-epitaxy/henini/978-0-12-812136-8>
- [15] T. Thorbeck és N. M. Zimmerman, „Formation of strain-induced quantum dots in gated semiconductor nanostructures”, *AIP Adv.*, köt. 5, sz. 8, o. 087107, aug. 2015, doi: 10.1063/1.4928320.
- [16] Ákos Nemcsics, „On the shape formation of the droplet epitaxial quantum dots”, *Microelectron. Reliab.*, köt. 56, o. 73–77, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2015.11.010>.

- [17] A. Branny, S. Kumar, R. Proux, és B. D. Gerardot, „Deterministic strain-induced arrays of quantum emitters in a two-dimensional semiconductor”, *Nat. Commun.*, köt. 8, sz. 1, o. 15053, máj. 2017, doi: 10.1038/ncomms15053.
- [18] Nobuyuki Koguchi, Satoshi Takahashi, és Toyohiro Chikyow, „New MBE growth method for InSb quantum well boxes”, *J. Cryst. Growth*, köt. 111, sz. 1–4, o. 688–692, 1991, doi: [https://doi.org/10.1016/0022-0248\(91\)91064-H](https://doi.org/10.1016/0022-0248(91)91064-H).
- [19] N. K. Nobuyuki Koguchi és K. I. Keiko Ishige, „Growth of GaAs Epitaxial Microcrystals on an S-Terminated GaAs Substrate by Successive Irradiation of Ga and As Molecular Beams”, *Jpn. J. Appl. Phys.*, köt. 32, sz. 5R, o. 2052, 1993, doi: 10.1143/JJAP.32.2052.
- [20] Stefano Sanguinetti, Sergio Bietti, és Nobuyuki Koguchi, „Chapter 13. - Droplet Epitaxy of Nanostructures”, in *Molecular Beam Epitaxy (Second Edition)*, Second Edition., Mohamed Henini, Szerk., Elsevier, 2018, o. 293–314. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812136-8.00013-X>.
- [21] Ákos Nemcsics, „Droplet Epitaxy as a Tool for the QD-Based Circuit Realization”, in *Nonmagnetic and Magnetic Quantum Dots*, V. N. Stavrou, Szerk., Rijeka: IntechOpen, 2017. doi: 10.5772/intechopen.70613.
- [22] A. Nemcsics, „Quantum Dots Prepared by Droplet Epitaxial Method”, in *Quantum Dots - Theory and Applications*, London, United Kingdom: IntechOpen, 2015, o. 120–149. doi: 10.5772/60823.
- [23] Y. Galitsyn, A. Lyamkina, S. Moshchenko, T. Shamirzaev, K. Zhuravlev, és A. Toropov, „Self-assembled Quantum Dots: From Stranski–Krastanov to Droplet Epitaxy”, in *Self-Assembly of Nanostructures, Lecture Notes in Nanoscale Science and Technology, Volume 12. ISBN 978-1-4614-0741-6. Springer Science+Business Media, LLC, 2012, p. 127, 2011, o. 127–200. doi: 10.1007/978-1-4614-0742-3_3*.
- [24] Ákos Nemcsics, Antal Ürmös, és Lajos Tóth, „Droplet Epitaxy and its Possibilities in Nano-electronics”, előadás 2018 7th International Symposium on Next Generation Electronics (ISNE), Taipei, Taiwan: IEEE, 2018, o. 122–124. doi: <https://doi.org/10.1109/ISNE.2018.8394694>.
- [25] Marian A. Herman, Wolfgang Richter, és Helmut Sitter, „Growth of Buffer Layers”, in *Epitaxy Physical Principles and Technical Implementation*, in Springer Series in Materials Science, no. 62. , Springer Berlin, Heidelberg, 2010, o. 58–62. [Online]. Elérhető: <https://doi.org/10.1007/978-3-662-07064-2>
- [26] Paul Harrison és Alex Valavanis, „Simple models of quantum wire and dots”, in *Quantum Wells, Wires and Dots*, 4. kiad., John Wiley & Sons, Ltd, 2016, o. 249–278. [Online]. Elérhető: <https://doi.org/10.1002/9781118923337.ch8>

- [27] Malin Premaratne és Govind P. Agrawal, „Introduction”, in *Theoretical Foundations of Nanoscale Quantum Devices*, Cambridge University Press, 2021, o. 1–40. [Online]. Elérhető: <https://doi.org/10.1017/9781108634472.002>
- [28] Banerjee, J.P. és Banerjee, S., „Low-Dimensional Semiconductors”, in *Physics of Semiconductors and Nanostructures*, 1. kiad., CRC Press, 2019, o. 229–261. [Online]. Elérhető: <https://doi.org/10.1201/9781315156804>
- [29] V. V. Pokropivny és V. V. Skorokhod, „Classification of nanostructures by dimensionality and concept of surface forms engineering in nanomaterial science”, *Mater. Sci. Eng. C*, köt. 27, sz. 5, o. 990–993, 2007, doi: 10.1016/j.msec.2006.09.023.
- [30] Paul Harrison és Alex Valavanis, „Semiconductors and heterostructures”, in *Quantum Wells, Wires and Dots*, 4. kiad., John Wiley & Sons, Ltd, 2016, o. 1–18. doi: <https://doi.org/10.1002/9781118923337.ch1>.
- [31] Igor Vurgaftman, Jerry R. Meyer, és Matthew P. Lumb, „Superlattice and Quantum-Well Band Structure”, in *Bands and Photons in III-V Semiconductor Quantum Structures*, OUP Oxford, 2020, o. 491–526.
- [32] John H. Davies, „QUANTUM WELLS AND LOW-DIMENSIONAL SYSTEMS”, in *The Physics of Low-dimensional Semiconductors: An Introduction*, Cambridge University Press, 1997, o. 118–149. [Online]. Elérhető: <https://doi.org/10.1017/CBO9780511819070.006>
- [33] T. Nakagawa, N. J. Kawai, és K. Ohta, „Design principles for CHIRP superlattice devices”, *Superlattices Microstruct.*, köt. 1, sz. 2, o. 187–192, 1985, doi: [https://doi.org/10.1016/0749-6036\(85\)90119-3](https://doi.org/10.1016/0749-6036(85)90119-3).
- [34] A. Tredicucci, C. Gmachl, F. Capasso, D. L. Sivco, A. L. Hutchinson, és A. Y. Cho, „Long wavelength superlattice quantum cascade lasers at $\lambda \approx 17 \mu\text{m}$ ”, *Appl. Phys. Lett.*, köt. 74, sz. 5, o. 638–640, febr. 1999, doi: 10.1063/1.123026.
- [35] Igor Vurgaftman, Jerry R. Meyer, és Matthew P. Lumb, „Quantum Cascade Lasers”, in *Bands and Photons in III-V Semiconductor Quantum Structures*, OUP Oxford, 2020, o. 491–526.
- [36] Jiahui Hu és mtsai., „Enhanced Performance of AlGaIn-Based Deep Ultraviolet Light-Emitting Diodes with Chirped Superlattice Electron Deceleration Layer”, *Nanoscale Res. Lett.*, köt. 14, sz. 1, o. 347, nov. 2019, doi: 10.1186/s11671-019-3201-x.
- [37] HÖDL Emil Viktor és mtsai., „Hallgatók által készített nagy hatásfokú napelemmel működő műhold = Students made stellite with efficient solar cells”, előadás XXVI. Nemzetközi Gépészeti Konferencia: 26th International Conference on Mechanical Engineering, Csibi Vencel-József és Barabás István, Szerk., Marosvásárhely, 2018, o. 204–207.

- [38] HÖDL Emil Viktor és mtsai., „SMOG-1 hallgatói műhold”, előadás XXXIII Kandó Konferencia, Csibi Vencel-József és Barabás István, Szerk., Budapest, 2018, o. 204–207.
- [39] Nemcsics Ákos, „Napelemek és nanostruktúrák – az űrtechnikára fejlesztett technológiák szilárd tudományos háttérrel biztosítanak a földi alkalmazású napelemfejlesztéseknek”, *Innotéka*, Budapest, Magyarország, 2025. augusztus 4. Elérés: 2025. november 17. [Online]. Elérhető: https://www.innoteka.hu/cikk/napelemek_es_nanostrukturak_az_urtechnikara_fejlesztett_techonologiai_szilard_tudomanyos_hatteret_biztositanak_a_foldi_alkalmazasu_napelemfejlesztéseknek.3214.html
- [40] HÖDL Emil Viktor és mtsai., „Az elmélet átültetése a gyakorlatba, avagy a hallgatói zsebműhold az űrben várakozáson felül teljesít”, előadás 28. Nemzetközi Gépészeti Konferencia - OGÉT 2020, Csibi Vencel-József és Barabás István, Szerk., Kolozsvár, 2020, o. 309–312.
- [41] M. Califano, „Quantum dots”, in *Quantum Wells, Wires and Dots*, John Wiley & Sons, Ltd, 2016, o. 279–302. doi: <https://doi.org/10.1002/9781118923337.ch9>.
- [42] M. A. Cusack, P. R. Briddon, és M. Jaros, „Electronic structure of InAs/GaAs self-assembled quantum dots”, *Phys Rev B*, köt. 54, sz. 4, o. R2300–R2303, 1996, doi: 10.1103/PhysRevB.54.R2300.
- [43] Antonio Marti, Colin Stanley, és Antonio Luque, „Understanding intermediate-band solar cells”, *Nat. Photonics - NAT PHOTONICS*, köt. 6, o. 146–152, febr. 2012, doi: 10.1038/nphoton.2012.1.
- [44] Igor Vurgaftman, Jerry R. Meyer, és Matthew P. Lumb, „Solar Cells, Thermophotovoltaics, and Nonlinear Devices Based on Quantum Wells”, in *Bands and Photons in III-V Semiconductor Quantum Structures*, Oxford University Press, 2020. doi: 10.1093/oso/9780198767275.003.0015.
- [45] M. Yoshida, N. J. Ekins-Daukes, D. J. Farrell, és C. C. Phillips, „Photon ratchet intermediate band solar cells”, *Appl. Phys. Lett.*, köt. 100, sz. 26, o. 263902, jún. 2012, doi: 10.1063/1.4731277.
- [46] A. Vaquero-Stainer és mtsai., „Semiconductor nanostructure quantum ratchet for high efficiency solar cells”, *Commun. Phys.*, köt. 1, sz. 1, o. 7, márc. 2018, doi: 10.1038/s42005-018-0007-6.
- [47] Amaury Delamarre, Daniel Suchet, Nicolas Cavassilas, Yoshitaka Okada, Masakazu Sugiyama, és Jean-François Guillemoles, „An Electronic Ratchet Is Required in Nanostructured Intermediate-Band Solar Cells”, *IEEE J. Photovolt.*, köt. 8, sz. 6, o. 1553–1559, 2018, doi: 10.1109/JPHOTOV.2018.2866186.
- [48] Ryne Raffaele és Nicholas Ekins-Daukes, „Thermodynamic Limits to Efficiency”, in *Nanostructures in Photovoltaics*, 1. kiad., Jenny Stanford

- Publishing, 2025. [Online]. Elérhető:
<https://www.jennystanford.com/9789814310727/nanostructures-in-photovoltaics/>
- [49] W. Shockley és H. J. Queisser, „Detailed Balance Limit of Efficiency of p-n Junction Solar Cells”, *J. Appl. Phys.*, köt. 32, sz. 3, o. 510–519, márc. 1961, doi: 10.1063/1.1736034.
- [50] Trailokya Nath Sasamal, Ashutosh Kumar Singh, és Anand Mohan, *Quantum-Dot Cellular Automata Based Digital Logic Circuits: A Design Perspective*, 1. kiad., köt. Studies in Computational Intelligence. Singapore, Singapore: Springer Nature Singapore Pte Ltd., 2020. [Online]. Elérhető: <https://doi.org/10.1007/978-981-15-1823-2>
- [51] Massimo Macucci, Szerk., *Quantum Cellular Automata (Theory, Experimentation and Prospects)*, 1. kiad. London, United Kingdom: Imperial College Press, 2006. [Online]. Elérhető: <https://doi.org/10.1142/p434>
- [52] C. S. Lent, P. D. Tougaw, W. Porod, és G. H. Bernstein, „Quantum cellular automata”, *Nanotechnology*, köt. 4, sz. 1, o. 49, 1993, doi: 10.1088/0957-4484/4/1/004.

Advanced Fault Protection and Stability in PV-Enhanced Urban Power System

József Bencsik[1], Dr.Habil Zsolt Conka[2], Réka Sváb[3]

[1] Óbuda University Doctoral School on Safety and Security Sciences, Bécsi út 96/B Budapest 1034, Hungary, bencsik.jozsef@uni-obuda.hu

[2] Óbuda University, Bécsi út 96/B Budapest 1034, Hungary, conka.zsolt@uni-obuda.hu

[3] Óbuda University, Bécsi út 96/B Budapest 1034, Hungary, Svab.reka@gmail.com

Absztrakt:

This study builds upon the findings of the Budapest Solar-Powered Project, which assessed the maximum feasible photovoltaic (PV) capacity within Budapest's low-voltage distribution network. It is aligned with the European Climate Initiative (EUKI) and the "Budapest Nappal hajtvá" programme, both of which aim to map rooftop solar potential and develop strategies for integrating renewable energy sources into urban power systems. By addressing these challenges, the research contributes to advancing climate neutrality and enhancing energy resilience in urban environments. The primary objective of this investigation is to extend the Budapest Load-Flow model to evaluate the impacts of elevated PV penetration levels on power flow dynamics, the recalibration requirements of overcurrent protection devices, and overall grid stability under variable operating conditions. Multiple fault scenarios have been analysed to compare network performance across varying levels of PV integration.

Kulcsszavak: Photovoltaic systems, fault protection, grid stability , low-voltage networks, power flow, analysis, smart grid

1. Photovoltaic Capacity in Budapest

The deployment of photovoltaic (PV) systems in urban environments has become a cornerstone of sustainable energy strategies. In Budapest, multiple initiatives have assessed the technical and spatial potential for rooftop PV installations, resulting in a range of projections and targets for the city's solar energy capacity. The Hungarian Transmission System Operator (MAVIR) has provided official forecasts for PV deployment within Budapest. In MAVIR's 2027 scenario, the pessimistic outlook—denoted as BP1—anticipates approximately 204MW of installed PV capacity. In contrast, the optimistic scenario for 2032, referred to as

BP2, estimates that PV capacity could reach up to 284MW within the capital.[7][9] Complementing these projections, the Budapest City Council conducted an independent assessment of PV deployment potential. Leveraging Light Detection and Ranging (LIDAR) technology, the council surveyed rooftop surfaces across the city to identify technically suitable areas for solar panel installations. This study concluded that Budapest's theoretical rooftop PV capacity could reach as high as 3000~MW.[1] Building upon these findings, prior research has sought to establish a realistic yet ambitious deployment threshold by analysing the voltage rise constraints associated with high levels of distributed PV generation. This network-focused analysis demonstrated that, under worst-case conditions—where all PV systems operate at maximum output while grid consumption remains minimal—the distribution network could accommodate up to 1500~MW of PV capacity without violating voltage limits. This threshold is denoted as BP3 in the subsequent comparative analysis.

Figure 1 illustrates the three deployment scenarios forming the foundation of this study:[1][7]

1. **BP1:** 204~MW — MAVIR 2027 pessimistic forecast
2. **BP2:** 284~MW — MAVIR 2032 optimistic forecast
3. **BP3:** 1500~MW — City Council grid-based deployable target

These scenarios provide a structured framework for assessing the impact of varying PV penetration levels on power flow patterns, fault current characteristics, and protection strategies within Budapest's medium- and low-voltage distribution networks.

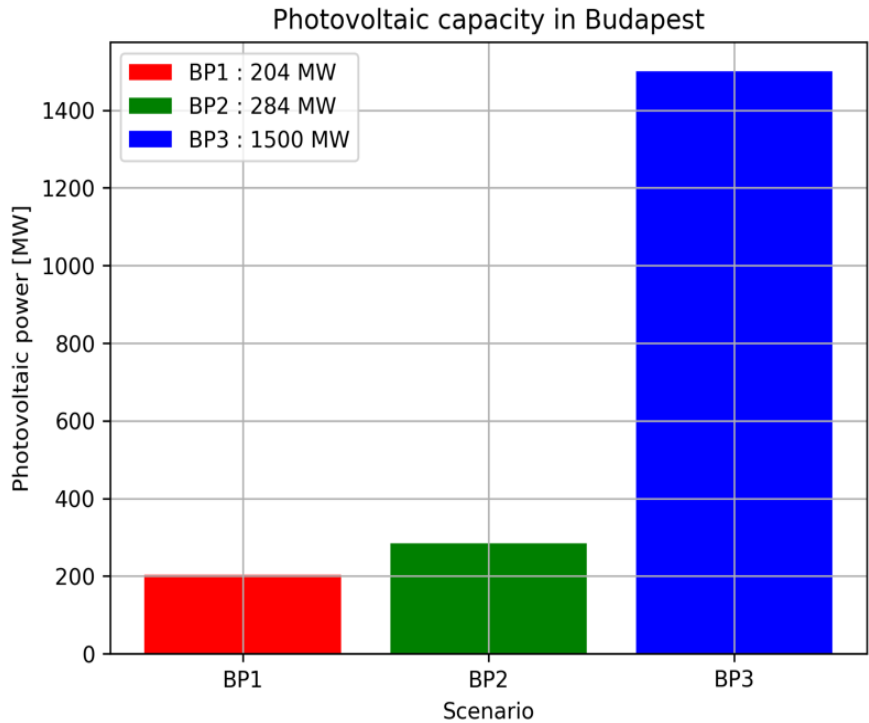


Figure 1 Summary of Budapest PV deployment scenarios (BP1, BP2, BP3).

2. Methodology and Data Preparation

This section outlines the methodology employed to simulate realistic load and generation conditions within Budapest’s low-voltage (LV) distribution network. Given the variability of rooftop solar installations and the uncertainties surrounding future deployment scales, the study uses scaled estimations based on historical projections and typical consumption profiles. Three primary datasets were utilised to support the fault current analysis: aggregated household load profiles, outdoor temperature trends, and estimated photovoltaic (PV) generation. These datasets are illustrated in Figure 2.[2]

2.1 Load Profile Aggregation

To replicate representative consumption behaviour, load profiles from 30 individual households were aggregated to form a comprehensive demand curve.

The resulting profile, displayed in the first row of Figure 2, reveals a peak power demand of approximately 70~kW. This value was used to calculate the median load, which subsequently served as the reference for distributing demand across multiple nodes within the LV network model.[2]

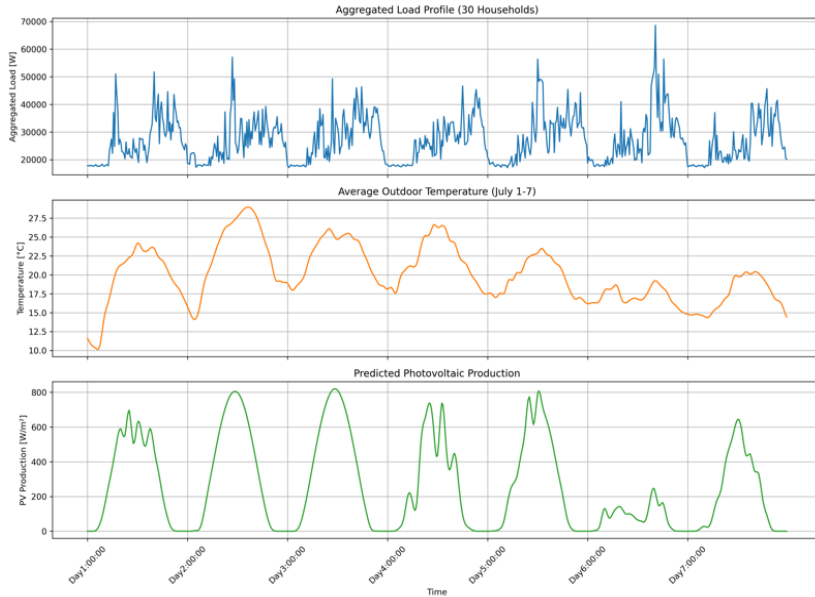


Figure 2. Load profile, outdoor temperature, and PV production estimations for Budapest network simulations.

In the simulation framework, sub-grids were assigned load values proportionally, reflecting the number of consumers they encompass. For instance, a sub-grid comprising 10 load nodes was allocated approximately one-third of the aggregated load profile. This proportional scaling ensures consistency between the simulated load distribution and actual consumption patterns, thereby providing a realistic foundation for analysing fault current behaviour.[2][3]

2.2 Outdoor Temperature and Seasonal Variability

The second row of Figure 2 illustrates the average outdoor temperature profile over the observation period. While temperature data was not directly utilised in the fault current simulations, it offers essential context for validating seasonal trends in load behaviour. Furthermore, it provides a valuable parameter for

potential future enhancements, such as incorporating temperature-dependent load or PV generation adjustments into the simulation model.[3]

2.3 PV Production Estimation

The third subplot in Figure 2 depicts the estimated photovoltaic production profile, expressed in W/m². As granular, rooftop-level production data was unavailable, this study employed generation estimates from the Budapest Solar-Powered Project, which is based on an assumed full deployment of 1500~MW PV capacity.

To accommodate different PV penetration scenarios aligned with MAVIR projections, the base production profile was linearly scaled according to the following scenarios:

1. **BP1 (204 MW):** MAVIR pessimistic forecast for 2027
2. **BP2 (284 MW):** MAVIR optimistic forecast for 2032
3. **BP3 (1500 MW):** Maximum rooftop deployment potential identified by the Budapest City Council using LIDAR assessment

The scaling process applied the following formula to preserve the profile shape while adjusting the amplitude:

$$PV_{scenario} = PV_{1500[MW]}_{base} \times \frac{ScenarioCapacity}{1500} \quad (1)$$

This approach maintains the temporal dynamics of the PV generation curve while accurately reflecting the impact of varying PV capacities. Through this methodology, the simulation captures how different levels of solar deployment influence fault currents and grid protection requirements across each scenario.

3. Grid Modelling and Simulation in Python

To investigate the impact of photovoltaic (PV) penetration on fault behaviour and line loading in Budapest's distribution network, a comprehensive low-voltage (LV) grid model was developed using the Pandapower Python library. The simulation framework is presented in Figure 3, illustrating the network topology, voltage levels, and line loading under varying PV deployment scenarios.[4][8]

3.1 Grid Structure

The simulated grid consists of three medium-voltage (MV) buses operating at 10kV, each connected to the external grid via standard 400kVA transformers. These transformers supply power to the LV side of the network, which operates at 0.4~kV. The network topology is derived from a real-world feeder identified as having a high potential for PV installation, selected from a dataset of approximately 33,000 transformer districts assessed during the Budapest PV deployment study.[1]

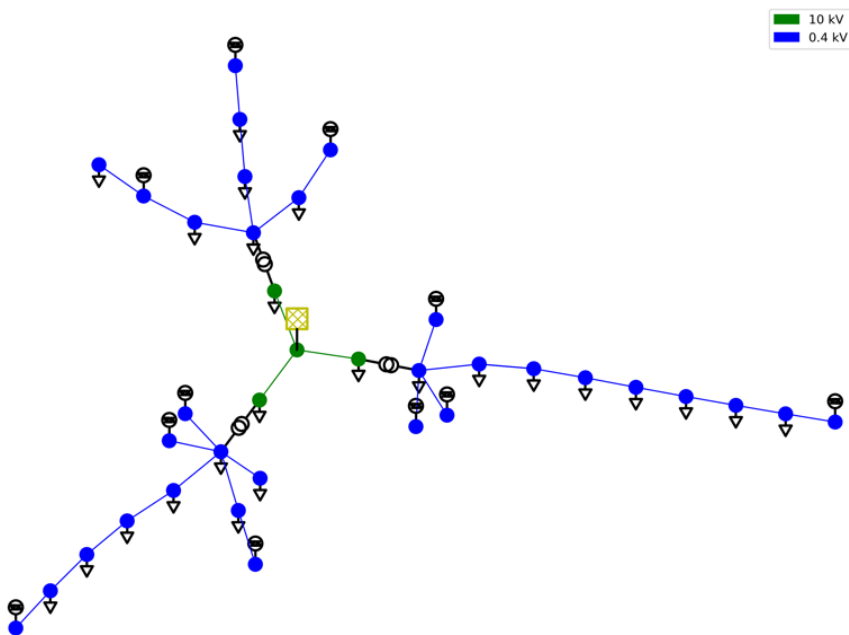


Figure 3a. Network topology and voltage levels of the modelled Budapest MV-LV grid.

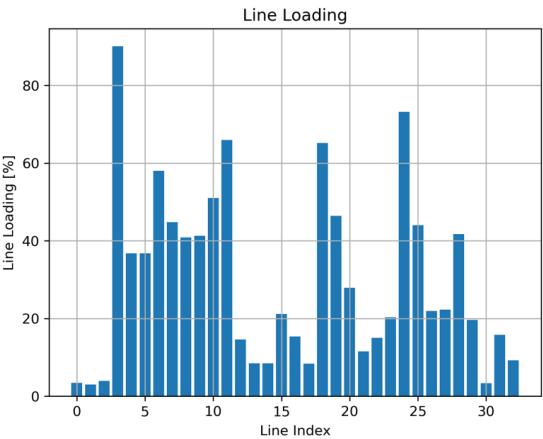
The LV network includes both residential loads and distributed PV generation units, spatially arranged based on data from prior LiDAR-based rooftop assessments. Each bus within the model is assigned load and/or generation parameters corresponding to its role in the scenario being simulated.[1]

3.2 Line Loading

Figure 3 also expressed as a percentage of rated capacity:

- 1. BP1 (204 MW PV penetration)
- 2. BP2 (284 MW PV penetration)
- 3. BP3 (364 MW PV penetration)

Under the BP1 capacity, indicated by the blue bars



expressed as a percentage of rated capacity:

deployment as a percentage of their rated levels.

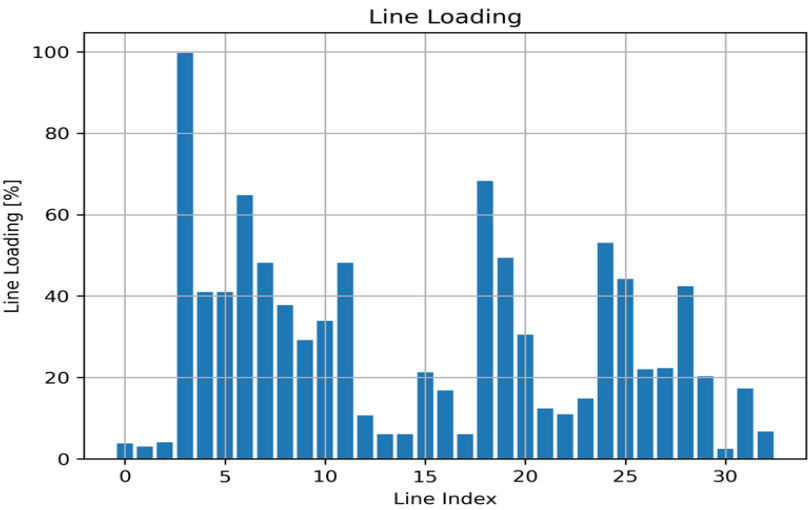


Figure 3b. Line loading under BP1 scenario (204 MW PV penetration).

In the BP2 scenario, line loading decreases even further as local PV generation offsets consumption, reducing power flows from upstream transformers. This observation confirms that moderate PV deployment can effectively relieve transformer and feeder stress by supplying power closer to consumption points.

Figure 3c. Line loading under BP2 scenario (284 MW PV penetration).

Conversely, under the **BP3** scenario, extensive overloading is observed across nearly all line segments, with loading levels ranging from 200% to 350%. This significant overloading arises from high levels of PV-generated current feeding back into the network, particularly during periods of maximum solar production. The results highlight critical risks associated with high-density rooftop solar deployment, emphasising the need for network reinforcements and advanced protection strategies.

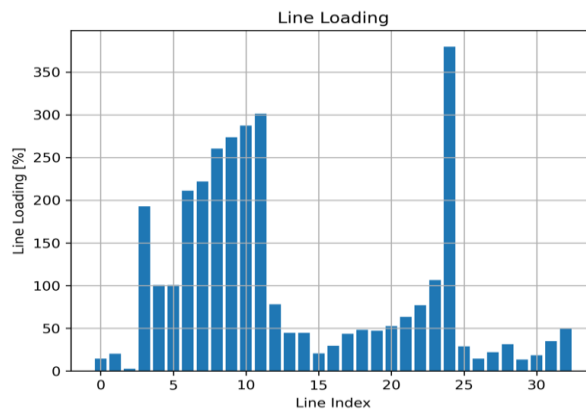


Figure 3d. Line loading under BP3 scenario (1500 MW PV penetration).

4. Fault Current Analysis under Different PV Scenarios

To assess the impact of varying levels of photovoltaic (PV) penetration on fault behaviour in the distribution network, a short-circuit analysis was performed using the developed Pandapower grid model. By introducing fault conditions at a random node within the low-voltage (LV) network, the simulation aims to capture realistic fault current responses in an urban environment with widespread distributed generation.

4.1 Fault Scenario Configuration

The fault scenario is illustrated in *Figure 4a*, depicting the selected node within the LV grid where a three-phase short-circuit fault was introduced. This random

selection represents typical fault conditions and enables a meaningful evaluation of system response in complex urban networks with high PV deployment.

The choice of a three-phase fault scenario reflects one of the most severe fault types, ensuring that protection system adequacy is tested under worst-case conditions. The analysis focuses on observing how distributed PV generation influences the magnitude and distribution of fault currents throughout the network.

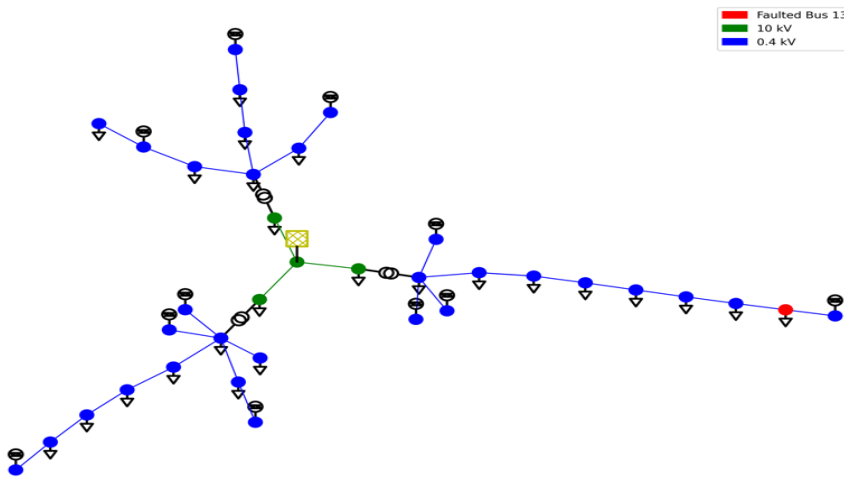


Figure 4a. Simulated fault location in the Budapest LV grid model.

4.2 Influence of PV Penetration on Fault Current Magnitudes

The simulation results, presented in *Figure 4b*, compare line fault current magnitudes between two PV penetration scenarios:

1. **BP1 (204 MW):** MAVIR pessimistic forecast for 2027
2. **BP3 (1500 MW):** Theoretical deployment limit proposed by the Budapest City Council

Under the **BP1** scenario, fault currents remain within expected operational limits, aligning with the design parameters of traditional overcurrent protection systems.

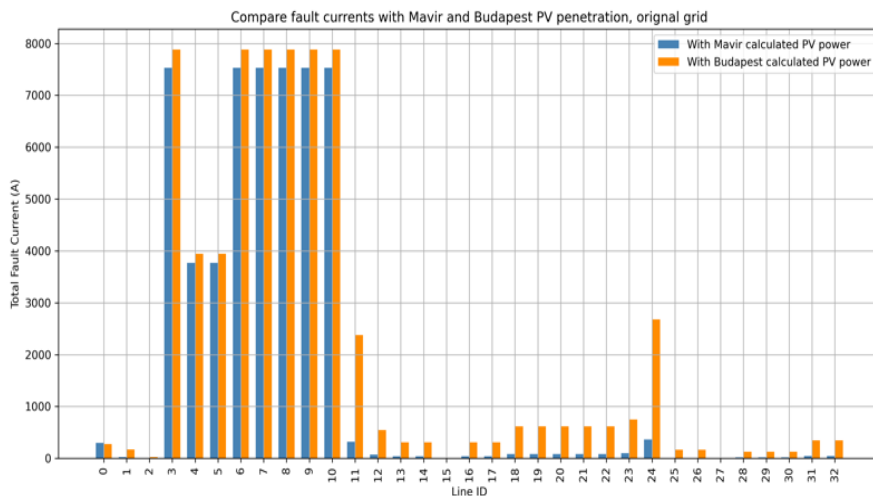


Figure 4b. Comparison of fault current magnitudes across network lines under BP1 and BP3 scenarios.

Conversely, the **BP3** scenario exhibits a substantial increase in fault current magnitudes. The elevated contribution of fault current from distributed PV installations significantly raises fault levels, particularly along lines electrically closer to major PV clusters. This amplification of fault current flow is a direct consequence of bidirectional current injection by decentralised PV systems during fault conditions.

The findings underscore a pivotal challenge for future grid operation: conventional overcurrent protection devices, calibrated for networks with unidirectional power flow and lower fault contributions, may become insufficient in high PV penetration environments. Without recalibration or the implementation of adaptive protection strategies, these devices risk miss-operation, either failing to detect actual faults or triggering unnecessary disconnections, both of which threaten the reliability and safety of the urban power grid.

5. Grid Topology Modification: From Radial to Looped Structure

To evaluate strategies for mitigating elevated fault currents in urban grids with high photovoltaic (PV) penetration, the original radial network design was modified to a looped (meshed) configuration. By enabling bidirectional power flows at both the medium-voltage (MV) and low-voltage (LV) levels, the

modified topology aims to improve fault current distribution and overall system resilience.

5.1 Modified Grid Configuration

The reconfigured network is presented in *Figure 5a*. In this design, additional lines were introduced to interconnect buses, forming closed loops. Such meshed topologies are widely adopted in urban environments to increase operational flexibility, enhance reliability, and provide redundancy during fault conditions.

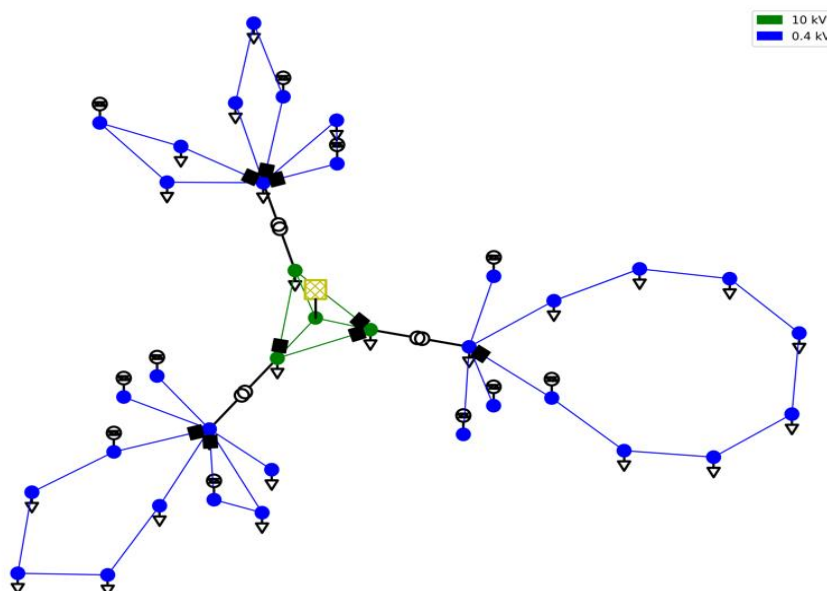


Figure 5a. Modified looped topology of the Budapest MV-LV grid.

Key characteristics of the looped configuration include:

1. **Multiple power flow pathways** that reduce voltage drops and alleviate line loading during normal operation.
2. **Alternative fault current paths** that redistribute fault currents, potentially decreasing thermal and mechanical stress on specific components.

5.2 Comparison of Fault Currents: Radial vs. Looped Networks

Figure 5b compares fault current magnitudes between the original radial grid and the modified looped topology, under the high PV deployment scenario defined by the Budapest City Council (1500 MW).

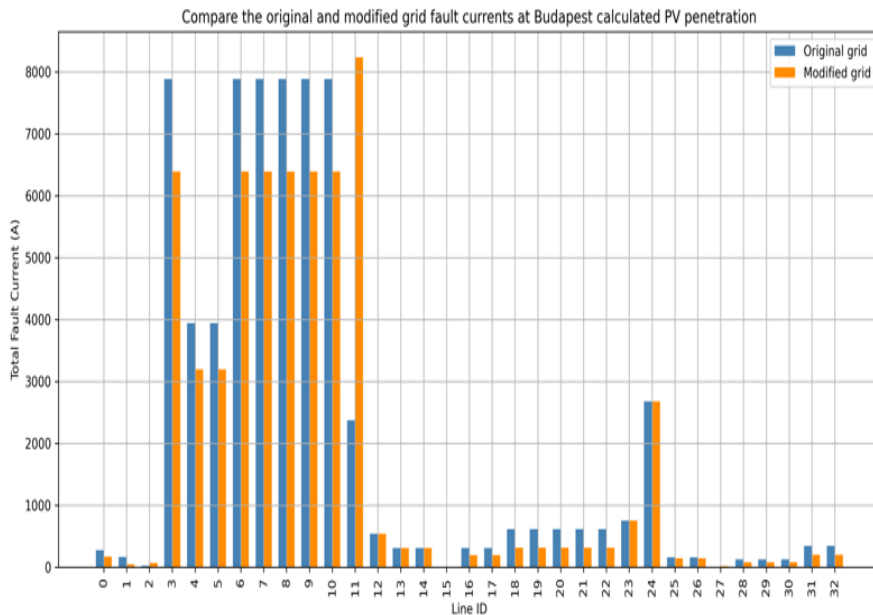


Figure 5b. Fault current comparison between radial and looped grids at 1500 MW PV penetration.

Key observations:

1. In most parts of the network, the looped configuration resulted in **significantly lower fault currents** compared to the radial design. The redistribution of currents across multiple paths helped mitigate localised overcurrent risks.
2. However, the **faulted line experienced an approximately 3.5-fold increase** in fault current relative to the radial scenario. This surge is explained by converging fault contributions from multiple feeding paths in the meshed network.
3. Although the looped design enhances fault tolerance in general, it simultaneously concentrates current at the fault location, emphasising the need for careful protection system coordination.

5.3 Protection Implications

The results highlight critical considerations for protection system design in looped urban networks with high PV penetration. Conventional overcurrent protection, typically calibrated for radial systems, may prove insufficient under these conditions.

Recommendations for protection system adaptation include:

1. **Directional protection schemes** to accurately detect the direction of fault currents and prevent malfunctions caused by bidirectional power flows.
2. **Adaptive protection settings**, which dynamically adjust tripping thresholds in response to real-time changes in generation and load conditions.
3. **Selective coordination**, ensuring that protection devices isolate only the faulted section without unnecessarily disconnecting healthy parts of the network.

By implementing these advanced protection strategies, grid operators can harness the benefits of looped network topologies while maintaining fault resilience and operational reliability in the face of growing renewable energy integration.[6]

6. Conclusion

This study examined the influence of increasing photovoltaic (PV) penetration on fault behaviour within Budapest's medium- and low-voltage (MV-LV) distribution network. The results confirm that, beyond their impact on voltage profiles, high levels of distributed PV generation substantially increase fault currents across the grid. These elevated fault levels challenge the adequacy of existing protection schemes, particularly in urban LV networks originally designed for unidirectional power flows and lower short-circuit currents.

A principal finding is that transitioning the network from a conventional radial design to a looped (meshed) topology effectively alleviates the widespread increase in fault currents associated with high PV integration. By providing multiple current pathways, the looped configuration redistributes fault currents, thereby reducing thermal and mechanical stress on individual lines and enhancing overall network resilience. Nevertheless, the analysis also identified a critical trade-off. While fault currents across most parts of the looped network are reduced, the faulted line itself experiences a significant rise in current magnitude—approximately 3.5 times higher than in the radial configuration. This concentration of fault energy underscores the need for advanced, adaptive protection systems that can dynamically respond to evolving fault conditions.

The findings validate the initial hypothesis that the challenges introduced by high levels of distributed renewable generation can be addressed through a combination of network reconfiguration and intelligent protection coordination. Specifically, protection strategies incorporating real-time data from Phasor Measurement Units (PMUs) and dynamic network sectionalisation can minimise the adverse effects of fault currents. Such adaptive systems can isolate faulted sections during disturbances and promptly restore normal operation following fault clearance, ensuring reliable grid performance even under extreme renewable integration scenarios. By providing actionable insights into fault management and protection design, this research contributes to the development of more robust and sustainable urban energy systems. These findings support the broader goals of climate neutrality while maintaining the safety and reliability of power distribution infrastructure.

REFERENCES

1. J. Bencsik and V. Becső, 'Load-Flow Model Optimized for the Solar Capacity of Cities', in *2024 IEEE 7th International Conference and Workshop Óbuda*

- on *Electrical and Power Engineering (CANDO-EPE)*, Oct. 2024, pp. 237–242. doi: [10.1109/CANDO-EPE65072.2024.10772879](https://doi.org/10.1109/CANDO-EPE65072.2024.10772879).
2. J. Muehlenpfordt, ‘Time series’. Open Power System Data, Oct. 06, 2020. doi: [10.25832/TIME_SERIES/2020-10-06](https://doi.org/10.25832/TIME_SERIES/2020-10-06).
 3. V. G. Kurbatsky and N. V. Tomin, ‘Smart system of monitoring and forecasting for electric power systems’, in *2012 IEEE International Conference on Power System Technology (POWERCON)*, Oct. 2012, pp. 1–6. doi: [10.1109/PowerCon.2012.6401289](https://doi.org/10.1109/PowerCon.2012.6401289).
 4. Sarhan, V. K. Ramachandaramurthy, T. Sieh Kiong, and J. Ekanayake, ‘Simulation and Validation of a New IEEE Reliability Test System (RTS-GMLC) using PyPSA’, in *2020 International Conference on Smart Grid and Clean Energy Technologies (ICSGCE)*, Oct. 2020, pp. 77–82. doi: [10.1109/ICSGCE49177.2020.9275636](https://doi.org/10.1109/ICSGCE49177.2020.9275636).
 5. Pál, L. Beňa, and Z. Čonka, ‘Optimization algorithms for calculation of selected network parameters’, in *2021 IEEE 4th International Conference and Workshop Óbuda on Electrical and Power Engineering (CANDO-EPE)*, Nov. 2021, pp. 167–172. doi: [10.1109/CANDO-EPE54223.2021.9667922](https://doi.org/10.1109/CANDO-EPE54223.2021.9667922).
 6. Q. Wang, Y. Li, and R. Li, ‘Integrating artificial intelligence in energy transition: A comprehensive review’, *Energy Strategy Reviews*, vol. 57, p. 101600, Jan. 2025, doi: [10.1016/j.esr.2024.101600](https://doi.org/10.1016/j.esr.2024.101600).
 7. ‘Hálózatfejlesztési tervek 2021-től - MAVIR - Magyar Villamosenergia-ipari Átviteli Rendszerirányító Zrt.’ Accessed: Mar. 10, 2025. [Online]. Available: <https://www.mavir.hu/web/mavir/halozatfejlesztesi-tervek-2021-tol>
 8. T. Phongtrakul, Y. Kongjeen, and K. Bhummkittipich, ‘Analysis of Power Load Flow for Power Distribution System based on PyPSA Toolbox’, in *2018 15th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)*, Jul. 2018, pp. 764–767. doi: [10.1109/ECTICon.2018.8619954](https://doi.org/10.1109/ECTICon.2018.8619954).
 9. R. Segurado, G. Krajačić, N. Duić, and L. Alves, ‘Increasing the penetration of renewable energy resources in S. Vicente, Cape Verde’, *Applied Energy*, vol. 88, no. 2, pp. 466–472, Feb. 2011, doi: [10.1016/j.apenergy.2010.07.005](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.07.005).

IoT-architektúra Intelligens Meteorológiai Állomásokhoz Firebase Segítségével Nagyobb Mennyiségű Adatkezeléshez

Tóth Áron, Tornai Tamás, Simon János

Tóth Áron, Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar, Óbudai Egyetem, Bécsi út 94-96., 1034 Budapest, Magyarország, tarontoth@vts.su.ac.rs

Tornai Tamás, Biztonságtudományi Doktori Iskola, Óbudai Egyetem, Népszínház utca 8, 1081 Budapest, Magyarország, tam.tornai@vts.su.ac.rs

Simon János, Mechatronikai és Automatizálási Intézet, Mérnöki Kar, Szegedi Tudományegyetem, Moszkvai krt. 9., 6720 Szeged, simon@mk.u-szeged.hu

Absztrakt: Napjainkban az Internet of Things (IoT) egyre nagyobb népszerűségnek örvend, és új lehetőségeket kínál okosotthonok számára a környezeti adatok gyűjtése, feldolgozása és megosztása terén. Ebben a munkában egy ESP32 mikrokontroller valós időben gyűjti az adatokat a különböző érzékelőktől, mérve az UV sugárzást, a hőmérsékletet, a páratartalmat, a légnyomást és a szélsébséget. Az ESP32 mikrokontroller képes vezeték nélküli kommunikációra, így képes Firebase segítségével történő adatkezelésre. A bemutatott architektúra a Firebase Realtime Database-el kombinálva nagyon hatékonyan és folyamatosan képes a szenzorok adatainak gyűjtésére, tárolására, frissítésére, szinkronizálására. Egy ilyen rendszer hasznos lehet az okosotthonok számára, a ház közelében történő időjárási viszonyok nyomon követésére, és nincs szüksége a helyi meteorológiai állomásokra, amelyek távolabb lehetnek az otthontól. A környezetből adatokat gyűjtő és tároló okosház csatlakoztatása az IoT-hez előnyösnek bizonyulhat a rendszert képező eszközök automatikus és kézi vezérlésében, mint például ebben az esetben egy árnyékoló. A szélsőséges időjárási viszonyok, valamint a szél és a napfény hirtelen változásai veszélyt jelenthetnek bizonyos eszközökre, amelyek képesek vagyunk megvédeni, ha olyan felhőszolgáltatáshoz csatlakoznak, ahonnan adatokat fogadnak az időjárási viszonyokról. A felhőhöz csatlakoztatott okoseszközök másik előnye a mezőgazdaságban rejlik, a helyi környezetből származó adatokra alapozva, ahol az ilyen rendszerek felhasználhatók a háztartás körüli növények öntözésének automatizálására, biztosítva az optimális vízfelhasználást és az egészségesebb növényzetet. Az érzékelők adatainak valós idejű megjelenítése és a kézi vezérlési lehetőségek javítják a felhasználói interakciót, míg az érzékelők adatainak tárolása és elemzése biztosítja a környezeti információk hosszú távú kezelését és elemzését. Eredményekként nyilvánvaló, hogy egy meteorológiai állomás integrálása egy okos házban egy adatbázissal nagyon hasznos lehet, és mind a jobb felhasználói élményhez, mind az ilyen eszközök automatikus vezérlésének továbbfejlesztéséhez vezethet.

Kulcsszavak: Adatbázis; Érzékelők; Firebase; Internet of Things (IoT); Környezeti adatok; Okoseszközök; Okosotthon; Valós idejű adatkezelés

1 Bevezető

Az elmúlt években egyre nagyobb mértékben terjednek el olyan okoseszközök, amelyek felhőalapú szolgáltatásokkal képesek kommunikálni. Számos előnnyel rendelkeznek az ilyen módon megvalósított eszközök, legfőképpen kommunikációs és adatgyűjtési szempontból, hiszen az IoT rendszerek lehetővé teszik a folyamatos információcserét [1].

Felhőn keresztüli kommunikáció számos új utat és lehetőséget megnyit előttünk, az adatok tárolásában és feldolgozásában, mivel többé nem feltétel az eszközök közötti fizikai kapcsolat létesítése. Továbbá megszűnnek a hardveres például ami a vezérlőnket illeti, nem fogynak el a kommunikációra szánt lábak, nem kell aggódnunk az adott kommunikációs protokoll maximális kapacitása elérésétől. Ebből adódóan a rendszerünkben jelen lévő eszközök száma könnyedén növelhető vagy csökkenthető tetszés szerint, valamint minden eszköz lekérheti a számára szükséges adatokat, nincs szükség Master-Slave struktúrára. Az adatok egyszerűen gyűjthetők egy adatbázisba és bármely eszköz kiértékelheti a számára jelentőséggel bíró paramétereket, és irányíthatja a rá bízott folyamatot. Az egyes eszközön mentett adatok számát így jelentősen le tudjuk csökkenteni, ezzel memóriakapacitást és energiát megtakarítva [2].

A felhő alapú kommunikáció lehetővé teszi számunkra, hogy a rendszerre olyan eszközöket is csatlakoztassunk, amelyek működésükhöz a szükséges energiát egy akkumulátorból nyerik. Ilyen eszközök általában két formában fordulnak elő egy okosotthonban: vagy hordozható eszközök vagy olyan eszközök, amelyek telepítésekor már nem volt lehetőség a megtáplálás odajuttatására. Hordozható eszközök nagyban tudják javítani a felhasználók interakcióját a rendszerrel, valamint kényelmesebbé és effektívebbé teszik a felhasználói élményt. Az akkumulátoros eszközök egyetlen hátránya, hogy töltésre vagy az elem cseréjére szorulnak bizonyos időközönként, szerencsére napjainkban az eszközökben használatos mikrovezérlők energiaigénye nem túl magas [3] [4].

1.1 Felhőalapú IoT-architektúrák és kommunikációs modellek áttekintése

Az IoT-re csatlakozó mikrovezérlők és szenzorok között lehetséges a valós idejű adatcsere egy felhő alapú adatbázison keresztül, a mai technológiai fejlettségnek köszönhetően. Li és társai [5] kidolgoztak egy JustIoT nevű rendszert, amelyben szemléltették, hogyan lehetséges a szenzoroktól gyűjtött adatokat eltárolni egy felhő alapú valós idejű adatbázisban, kifejezetten egy Firebase Real Time adatbázisban. A tanulmányból bebizonyosodik, a felhő alapú valós idejű architektúra és szenzoradatcsere rugalmassága és skálázhatósága.

Domíniguez-Bolaño [6] és munkatársai tanulmányából sokat megtudhatunk az IoT architektúrák mai állásáról, a technológia alapjairól, elképzelhető jövőjéről. Részletekbe merülő munka, amelyből megtudhatjuk, milyen módon kapcsolódnak az érzékelők és hogyan zajlik le az adatcsere valós időben az eszközeink között. Hangsúlyozzák, hogy a skálázhatóság és a platformfüggetlenség elengedhetetlen a megbízható adatáramláshoz.

A Cameroni Egyetem kutatócsoportja [7] felhívta a figyelmünket, egy kommunikációs problémára, amely abból ered, hogy az IoT rendszerekhez eszközöket gyártó cégek, mindegyike valamilyen egyedi protokollt használ eszközei közötti kommunikációra. A csapat ajánlott egy megoldást a problémára, mégpedig olyat, amellyel nem kellene módosítani a már beépített eszközök fizikai jellemzőit. A felajánlott megoldás egy felhőben megtalálható adatbázison keresztül megvalósított kommunikáció az eszközök között, amely növeli az IoT rendszerek skálázhatóságát.

2 Felhőalapú meteorológiai rendszer tervezése

Az előzőekben ismertetett tulajdonságokat figyelembe véve érdemes felállítani egy tervet és elvárásokat egy felhőalapú kommunikációval rendelkező meteorológiai állomással szemben. Egy ilyen rendszer képes kell legyen kommunikációra, adatgyűjtésre és kiértékelésre, skálázható kell legyen és biztosítani kell módot az adatok megjelenítésére is. Tervezéskor figyelembe kell venni mely adatokat érdemes kinyerni a környezetből, valamint meghatározni milyen érzékelőkkel, vezérlővel és más hardverrel érjük el a kitűzött célokat.

2.1 A rendszerrel szemben támasztott elvárások

A rendszerrel szemben támasztott elvárásokat össze kell állítani funkcionalitás, kezelhetőség és megbízhatóság szempontjából. Legfontosabb szempontok, a valós idejű adatgyűjtés, valós idejű felhőalapú kommunikáció és az adott eszközben történő adatkiértékelés, és lehetőleg alacsony energiaigény. A szempontokat figyelembe véve kiderül, hogy a legfontosabb kiválasztani a megfelelő mikrovezérlőt, valamint felhő szolgáltatást.

A mikrovezérlő képes kell legyen vezeték nélküli internetkapcsolatra, amelyre automatikusan újra csatlakozik minden bekapcsolás után, emberi beavatkozás nélkül. Továbbá képesnek kell lennie ezen kapcsolaton keresztül kommunikálni egy adatbázissal, különböző kommunikációs típusok megvalósítására a perifériális lábakon, a különböző szenzoradatok begyűjtéséhez, elegendő lábbal a különböző jelenlegi perifériák számára és jövőbeli skálázhatósághoz.

A felhőalapú szolgáltatáshoz is fontos kitűzni néhány elvárást, éspedig képes kell legyen valós idejű kétirányú adatszinkronizációra, hogy a csatlakoztatott kliensek között az adatáramlás zökkenőmentesen történjen és a kommunikációban ilyen módon az eszközök egymásnak parancsokat is tudjanak küldeni, ne csak adatokat lekérni. Az adatok strukturált tárolása is elengedhetetlen, hogy elkülönüljenek egymástól a mérési adatok és a vezérlési parancsok. Az adathozzáférés is lekérdezés is gördülékenyen kell történjen, úgy ahogy a kliensek becsatlakozása is miután újból feszültséghez jutottak. Magas újraírhatósági sebessége, és alacsony késleltetéssel kell rendelkezzen az adatbázis, valamint skálázhatónak kell lennie a későbbi bővítések céljából. Elvárás, hogy tartalmazzon hitelesítési és engedélyezési mechanizmusokat is, hogy minden eszköz csak a számára engedélyezett helyre tudjon adatokat bevinni és olvasni.

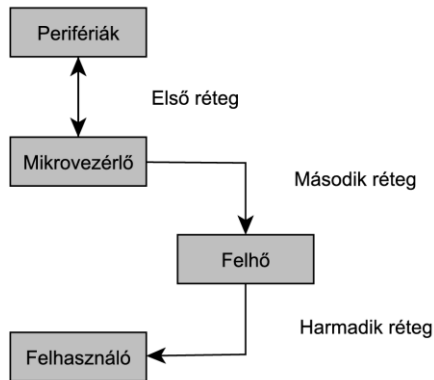
A szenzoroktól elvárható, hogy magas mérési pontossággal és nagy felbontással rendelkezzenek. A mért értékek nem térhetnek el a valós fizikai értékektől, fontos a hiteles adatokkal való munka [8]. Elvárás továbbá az érzékelőktől, hogy integrálhatóak a rendszerben található vezérlőkkel, tehát olyan vagy valamilyen kommunikációs protokollt, vagy jelszint alapján lehetőséget kell biztosítani az adatok kinyerésére. Az érzékelők alapvetően a kinti környezetről szolgáltatnak adatokat, ezért fontos, hogy alapvetően vízhatlanok és napállóak legyenek vagy ha ez nem adott, akkor az kint használatos eszközöket ilyen módon kell tervezni. Ha a rendszerünk tartalmaz hordozható mérő egységet, akkor ezen elvárások bővülnek egy szemponttal, amely az alacsony energiaigény.

A rendszernek nemcsak a hozzá tartozó eszközökkel, és a felhővel kell kommunikációt létesítsen, hanem a felhasználóval is. Különböző módok léteznek a rendszer számára, amelyekkel tud kommunikálni a felhasználóval, legfontosabb kikötés, hogy a felhasználónak rálátása legyen a mért adatokra és beleszólása a vezérlés módjába vagy a vezérlés felülírásába, kedve szerint. Lehetséges módok közé tartoznak a különböző kijelző egységek használata, amely lehet vagy hordozható, további lehetőség egy mobilapplikáció, amellyel bárholonnan hozzáférhetünk rendszerhez, vagy egy weboldal, amelynek elérése a belső hálózaton keresztül történik [9].

2.2 Lehetséges kommunikációs- és rendszerarchitektúra

Egy IoT rendszer kommunikációs architektúrája alapvetően 3 rétegből áll. Az első kommunikációs rétegbe tartozik a mikrokontroller és a hozzá tartozó perifériák közötti kommunikáció, fontos a gyors és folyamatos adat frissítés, amely általában vezetékkel valósul meg. A második réteg a mikrokontroller felhővel való kommunikációját jelenti, amely kétirányú, tehát a mikrokontroller nem csak küldd adatokat a valós idejű adatbázis felé, hanem fogad is. A harmadik kommunikációs réteg a felhasználói kommunikáció, amely engedélyezi a felhasználót az adatok

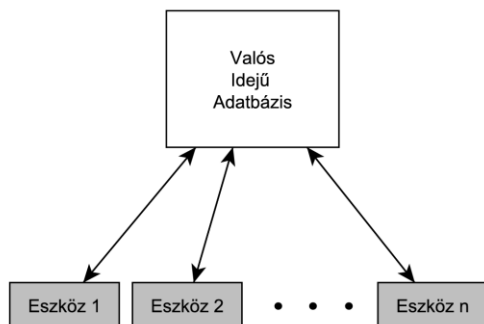
megfigyelésére és vezérlésre (1. ábra). Megvalósítható folyamatok távoli működtetése is az adott kommunikációs struktúrából kifolyólag [11].



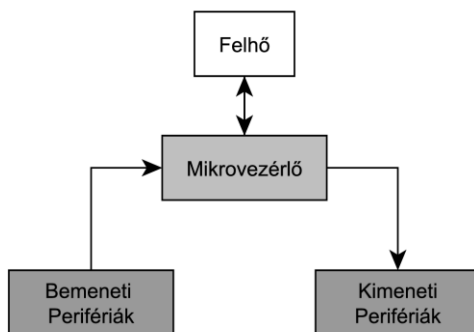
1. ábra
Kommunikációs rétegek

2.2.2 Lehetséges rendszerarchitektúra

Rendszerarchitektúra szempontjából fontos figyelembe venni, hogy a kommunikáció a felhőn keresztül zajlik az egyes eszközök között (2. ábra). Egy lokális környezeti adatokat gyűjtő rendszer architektúráját képezhetik mérőeszközök, amelyek adatokat gyűjtenek a környezetből, vagy felhasználói eszközök/felületek, amelyek az adatok felhasználó felé való eljuttatásáért felelnek, valamint képesek néhány utasítás fogadására és továbbítására a felhő alapú kommunikáción keresztül. Vezérlő egység is külön megjelenhet a rendszerbe, az adott folyamat vezérléséhez vagy irányításához, de elképzelhető, hogy a felsorolt eszközfajták kombinálva közös tokba kerülnek. A rendszerarchitektúra minden esetben olyan módon fog megvalósulni, hogy maga a valós idejű adatbázis kommunikál a mikrovezérlőkkel a felhőn keresztül, a mikrovezérlők pedig a rájuk kapcsolt perifériákkal, az eszközarchitektúrát a 3. ábra szemlélteti.



2. ábra
Rendszerarchitektúra



3. ábra
Eszközarchitektúra

3 Meteorológiai állomás megvalósítása

Figyelembe véve a 2. fejezetben ismertetett elvárásokat és lehetőségeket, elkészíthető a felhőalapú kommunikációval rendelkező lokális meteorológiai állomás. Elsősorban a vezérlőt érdemes jól megválasztani, majd ügyelni az érzékelők megválasztására, és adatbázisra. A rendszer és a felhasználó interakciójára sok lehetőség megvalósítható, ezen munkában egy egyszerűbb megoldásra esett a választás, csupán abból kifolyólag, hogy szemléltesse a felhőalapú kommunikációt, mikrovezérlők között, nem pedig egy mobileszközzel vagy egy számítógéppel.

3.1 ESP32 Mikrovezérlő

Az ESP32 mikrovezérlő egy nagy teljesítményű, vezeték nélküli kommunikációra alkalmas mikrovezérlőlap, amelyet az Espressif Systems fejlesztett ki (). Optimális megoldás IoT projektek megvalósítására, nemcsak a gyors és megbízható vezeték nélküli kapcsolat miatt, hanem rendelkezik számos kommunikációs móddal a lábain, amely lehetővé teszi az adatkinyerést a legtöbb érzékelőből. A mikrovezérlő 3.3V feszültség szinten üzemel, programozására az Arduino IDE környezetben került sor.

A munkában az ESP32-Wroom típus volt használva, amely architektúrája két Xtensa LX6 32 bites mikroprocesszort tartalmaz, amely lehetővé teszi, hogy egyik mag a kommunikációs feladatokra lássa el, a másikon pedig a lábakra csatlakoztatott perifériák vezérlése történjen. Vezeték nélküli kommunikációk terén rendelkezésre áll Wi-Fi (IEEE 802.11 b/g/n) és Bluetooth (BLE⁴). Perifériák széles skálája csatlakoztatható a be- és kimeneti lábakra (GPIO⁵ portokra), amelyek többféle funkciót láthatnak el, egyes lábak képesek digitális jelet analóggá alakítani (DAC⁶), vagy fordítva (ADC⁷), mások rendelkeznek digitális kommunikációs protollokkal akár. A lábkiosztást az 4. ábra szemlélteti, az egyes lábak funkciója a **Hiba! A hivatkozási forrás nem található.** kerül ismertetésre, azon funkciókkal feltüntetve, amelyek ezen munka szempontjából fontosak lehetnek. A vezérlő rendelkezik 25 GPIO porttal, ezek közül 2 lett előre látva I2C kommunikációra, 9 port 3 különböző SPI⁸ kommunikációs módra, 4 port 2 különböző UART⁹ kommunikáció számára. 21 port rendelkezik PWM modulációval, akár ADC, DAC vagy mindkettővel, 15 GPIO pin úgynevezett RTC¹⁰ portok, amelyek képesek felébreszteni a vezérlőt alvó állapotából, ha olyan környezetben használjuk.

⁴ BLE – Bluetooth Low Energy

⁵ GPIO – General Purpose Input Output

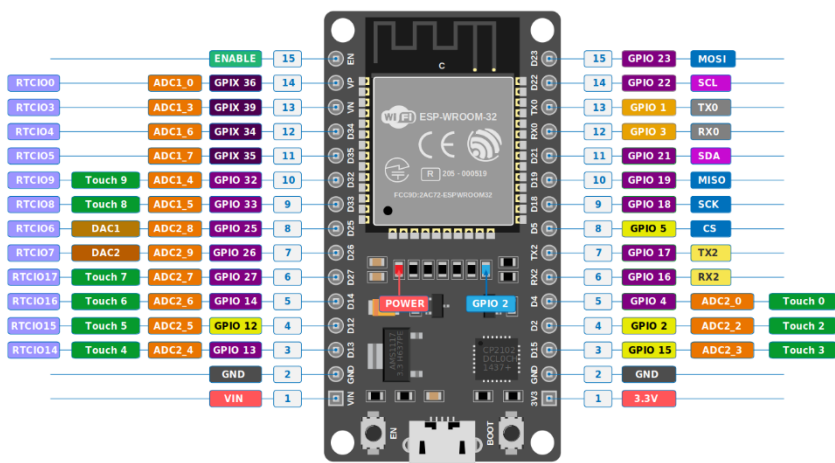
⁶ DAC – Digital Analog Converter

⁷ ADC – Analog Digital Converter

⁸ SPI – Serial Peripheral Interface

⁹ UART – Universal Asynchronous Receiver/Transmitter

¹⁰ RTC – Real Time Clock



4. ábra

ESP32 Wroom lábkiosztása

3.2 Érzékelők

3.2.1 BME280

A BME280 egy a Bosch Sensortec által fejlesztett kombinált környezeti szenzor, amely képes légnyomás, relatív páratartalom és hőmérséklet mérésére. Modulra szerelt változata a ábrán látható, amely változat ebben a munkában használatra került.

Légnyomás mérésekor fény derül a tengerszint feletti magasságra, hektopascalban (hPa) kifejezve. A meteorológiai állomások ebből tudnak következtetni, a rövid távú időjárás előrejelzésre, alacsony légnyomás a rossz időjárás, viharok hírnöke, a magas légnyomás pedig a derűs, stabil időjárásé, a nyomásváltozás is figyelhető és elemezhető. Mérési tartomány 300 hPa- tól 1100 hPa-ig terjed, ebben a tartományban a pontosság ± 2.25 hPa, a szenzor felbontása 0.0018 hPa. A hőmérsékletet fok-Celsiusban ($^{\circ}\text{C}$) fejezi ki, mérési tartománya -40°C -tól $+85^{\circ}\text{C}$ -ig terjed, pontossága 0°C - tól 65°C -ig $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$, felbontása 0.01°C . Relatív páratartalom mérési eredményét százalékosan (%) fejezi ki, nagy linearitással és Histerézis-menteséggel ($\pm 1\%$), $\pm 3\%$ pontossággal és 0.008%-os felbontással [10]. A relatív páratartalomból és a hőmérsékletből kiszámolható a harmatpont, amely a levegő valódi nedvességtartalmát eredményezi, valamint a hőérzet. A hőérzet számítására leggyakrabban a Magnus-Teten egyenlet használatos:

$$T_{DP} = \frac{b \cdot \gamma(T, RH)}{a - \gamma(T, RH)} \quad (1)$$

Ahol:

$$\gamma(T, RH) = \frac{a \cdot T}{b + T} + \ln(RH/100)$$

T: Hőmérséklet Celsius-fokban

RH: Relatív páratartalom százalékban

a és b: Empirikus állandók, általában $a \approx 17.27, b \approx 237.7$

Kommunikációs protokollokkal lehetséges a mikrovezérlő és az érzékelő közötti adatsere, név szerint SPI és I2C, jelen munkában az I2C került alkalmazásra egyszerűsége és kisebb lábigenye miatt, a 0x76 címen érhető el. A szenzor alapvetően kalibrálva érkezik, a belső memóriájában el vannak tárolva a mikrovezérlő számára a mérések pontos lebonyolításához szükséges kompenzációs adatok. A szenzor továbbá támogat alacsony energiafogyasztású üzemmódokat, alvó módba helyezhető.

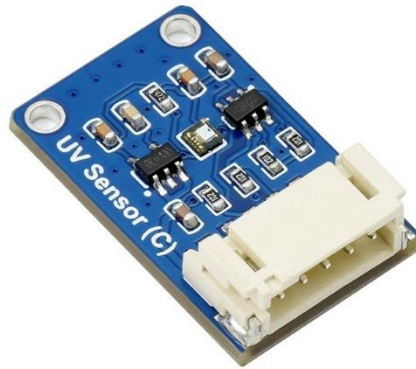


5. ábra
BME280 érzékelő

3.2.2 LTR-390

Az LTR-390 egy digitális érzékelő, amely a látható fény és az ultraibolya sugárzás mérését képes megvalósítani. Két speciális fotodióda segítségével méri az UV-A (315-400 nm) és UV-B (280-315 nm) hullámhosszokat, amelyekből számítandó az UV Index. Látható fény érzékelése a 0.01-64000 Lux tartományban történik, az adatokat maximum 20 bites felbontással kódol. Akárcsak a BME280 az LTR-390 is egy modulra felszerelt szenzor formájában került alkalmazásra ezen munkában,

amelyet a 6. ábra szemléltet. A mikrovezérlő az érzékelővel, jelen modul esetében I2C protokollal létesíthet kapcsolatot, a 0x53 címen.



6. ábra
LTR390 érzékelő

3.2.3 Anemométer

Jelen munkában a szélesebbség mérésére egy háromkanalas mechanikus rotációs anemométer (7. ábra) került alkalmazásra, ezen struktúra a szél kinetikus energiáját a tengely forgásába fordítja át. A forgást egy a tengely végére csatlakoztatott kis generátor alakítja analóg jellé, 0-5V tartományban, ezen analóg jelet a mikrovezérlő egyik ADC képes lábára kapcsolva az így kinyert adatból számítható a szél sebessége. Az ESP32 mivel nem 5V hanem 3.3V feszültségen üzemel, ezért feszültségosztó ellenállásokat szükséges beiktatni és a programkódban megfelelően korrigálni a beolvasott értéket. Mérési tartománya 0-30m/s, 0.01m/s pontosság mellett. Fontos megemlíteni, hogy ezen anemométer számára szükséges külső feszültségforrás, mivel 10-30V egyenfeszültséggel üzemel, így ez az érzékelő, ilyen kivitelezésben nem felhasználható akkumulátoros eszközökben.



7. ábra

Háromkanalas anemométer

3.3 Kijelző egység

A kijelző egység magába foglal egy kijelzőt, két nyomógombot, és egy ESP32 Wroom mikrovezérlőt. A kijelzőn megjelennek a mért adatok, a mellette található gomb pedig a vezérlésre szolgál. Az adatokat, amelyek megjelennek a kijelzőn a mikrovezérlő a felhőből olvassa le, és tölti fel a gombokra beprogramozott vezérlő utasításokat a Firebase adatbázisba. Kijelzőként egy SSD1306 0.96" kék háttérvilágítású OLED 128x64 felbontású kijelző került kiválasztásra, amely I2C kommunikációval létesít kapcsolatot a mikrovezérlővel, és egy 3D nyomtatással PLA-CF¹¹ anyagból készített dobozba lett becsomagolva, 8. ábra szemlélteti.



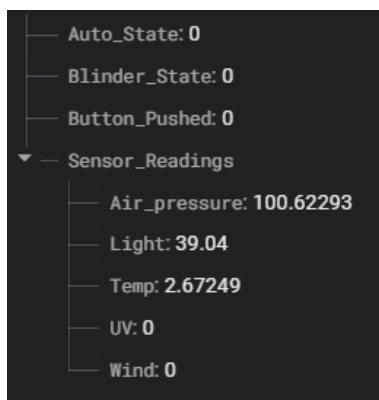
8. ábra

Kijelző egység

¹¹ PLA-CF – PolyLactic Acid – Carbon Fiber (Politejsav szénzál-erősítéssel)

3.4 Firebase Realtime Database

A Firebase Realtime Database egyike a Google Firebase platform szolgáltatásainak, felhő alapú, NoSQL¹² adatbázis, amely valós idejű adatszinkronizációra képes. A Firebase Realtime Database ellentétben a hagyományos modellekkel nem a lekérdezésekre válaszol az eszközöknek, hanem folyamatos, perzisztens kapcsolatot tart fenn a feliratkozott kliensekkel, és ha bármely adat módosul, az leküldésre kerül minden csatlakoztatott eszköz felé. A NoSQL struktúrájának köszönhetően sokkal rugalmasabban oszlanak el az adatok, nem sorokból és oszlopokból áll össze, mint egy relációs adatbázis, hanem az összes adat egy hatalmas JSON¹³ fa struktúrában tárolódik. A fa struktúrában úgynevezett kulcs-érték párokként kerülnek tárolásra az adatok, a kulcsokat az elérési útvonalon keresztül lehetséges megközelíteni. A Firebase Realtime Database fa struktúrája egy fajta séma-nélküliséget eredményez, amelynek köszönhetően, rugalmasan, módosítható az adatbázis, minden ága tetszés szerint, a kulcs-érték pároknak köszönhetően, 9. ábraán megfigyelhető a struktúra. Az adatbázis bővíthető biztonsági szabályokkal (Security Rules), amelyek segítségével csak azon kliensek férhetnek hozzá az adatbázishoz, akik követik a megadott JSON szabályrendszert. Ilyen módon akár meg is határozható, hogy mely eszközök írhatnak felül bizonyos adatokat, és melyek csak olvashatják őket. Az Arduino IDE környezetbe betölthető a Firebase dedikált könyvtára, amely segítségével az ESP32 mikrokontroller eléri az adatbázist, és le tudja futtatni a szükséges biztonsági bejelentkezéseket, és létrehozzák a folyamatos adatszinkronizálást.



9. ábra
Firebase Realtime Database-ben tárolt adatok

¹² NoSQL – Rugalmas séma, nem táblázatokhoz kötött adattárolás

¹³ JSON – JavaScript Object Notation

4 A rendszer skálázhatósága és előnyei

4.1 Skálázhatóság

A megvalósított rendszerről elmondható, hogy hardveres és szoftveres szempontból is rugalmasan fejleszthető és bővíthető. A felhőalapú kommunikáció rugalmasan skálázható, magas interoperabilitást engedélyez az eszközök között. Hardveres szempontból a skálázhatóság két módon képzelhető el, az egyik, hogy újabb eszközök kapcsolódnak a rendszerbe, amelyik az egyszerűbb eset a rugalmas szoftveres skálázás miatt. A másik eset, ha valamelyik eszköz bővítése a cél, például egy új érzékelő vagy vezérlési folyamat hozzáadásával, ebben az esetben felléphetnek hardveres korlátok. Megoldás lehet ilyen típusú problémára, hogy az eszközökben található nyomtatott lapokon több becsatlakozási pont kerül felforrasztásra, mint ahány kihasználásra kerül. Az ilyen hozzáadott pontok csatlakozhatnak, a különböző kommunikációs protokollokkal ellátott buszokhoz (I2C, SPI), vagy akár bármely GPIO porthoz, egy referenciaponttal párban egy csatlakozóval [12].

4.2 Lokális környezeti adatok gyűjtésének előnyei

A lokálisan gyűjtött adatok rendelkeznek egy nagy előnnyel a távolabb található meteorológiai állomásoktól, mégpedig a mért adatok közvetlenül a helyszínről származnak, így pontosabb adatokat szolgáltatva az adott terület időjárási viszonyairól. Az ilyen módon gyűjtött adatok különösen fontosak lehetnek amikor a mikroklíma eltér az állomás adataitól, valamint alkalmazható különböző körülmények melletti mérésre, amelyek esetében nem is releváns az állomások által szolgáltatott adatok. Lehet mérni akár árnyékban, akár valamilyen belső környezetben a viszonyokat és az így kapott adatok alapján vezérelni eszközöket. Egy IoT rendszerbe akár több mérő egység is bekapcsolható, és a Firebase Realtime Database fa struktúráját és biztonsági funkcióit kihasználva az eszközök között optimálisan eloszthatóak az adatok. Minden eszköz a számára megszabott helyre tölt fel az adatokat, így akár felosztható az egész okosotthon még szobánként is ha szükséges.

4.2.1 Lokálisan gyűjtött adatok és meteorológiai állomástól kapott adatok összehasonlítása

Az 1. táblázat szemlélteti a hivatalos meteorológiai állomás által mért időjárási adatokat, 10 napon keresztül, az időpontok megközelítőleg kerültek kiválasztásra a lokális mérés megvalósulásainak időpontjaihoz. A mért adatok a hivatalos szerbiai meteorológiai szövetség honlapjáról kerültek a táblázatba [13], a Szabadkához legközelebbi állomás Palicson található.

1. táblázat
Hivatalos meteorológiai állomás által mért adatok

Dátum és idő	Hőmérséklet	Páratartalom	Légnyomás	UV Index	Szélesség
2025.11.06 13:00	14°C	58%	1021 hPa	2	4 km/h
2025.11.08 10:00	9°C	97%	1016 hPa	1	4 km/h
2025.11.11 13:00	7°C	97%	1020 hPa	1	4 km/h
2025.11.12 16:00	7°C	99%	1024 hPa	1	2 km/h
2025.11.13 16:00	8°C	95%	1024 hPa	1	4 km/h
2025.11.14 10:00	4°C	97%	1023 hPa	1	2 km/h
2025.11.15 10:00	11°C	88%	1017 hPa	1	4 km/h
2025.11.16 16:00	16°C	64%	1012 hPa	1	6 km/h
2025.11.17 13:00	19 °C	51%	1002 hPa	1	11 km/h
2025.11.18 13:00	8°C	60%	1021hPa	1	4 km/h

A 2. táblázat szemlélteti a munkában ismertetett rendszer által mért lokális adatokat, a mérések kint a szabadban lettek elvégezve. Megfigyelhetők kis eltérések az adatokban, az adott időpontokra, amelyeket betudhatunk a hivatalos állomástól való távolságnak és folyamatosan kissé változó időjárásnak. Viszont megfigyelhető két kiugró adat, egyik 2025. 11. 06.-án az UV Index, másik 2025. 11. 08.-án a szélesség. Fontos figyelembe venni az említett mérésekhez hasonló mérési adatokat, mivel nem szerepelnek a hivatalos állomás által végzett mérésekben, pontosan az ilyen adatok miatt érdemes végezni a lokális adatgyűjtést. Ezen munkában megvalósított rendszer mindkét adatra reagált volna, első esetben nyitotta volna, másodikban zárta volna az árnyékolót. Környezeti adatok mérésekor nemcsak a kiugró adatok bizonyulhatnak fontosnak, hanem olyan adatok is amelyek eltérnek az állomás által közvetített adatoktól, mivel a

mérőegység nem feltétlenül kell a szabadnak helyezkedjen el (például a páratartalom üvegházak esetén).

2. táblázat
Lokálisan mért időjárási adatok

Dátum és idő	Hőmérséklet	Páratartalom	Légnyomás	UV Index	Szélesebesség
2025.11.06 13:11	13.6°C	61%	1019 hPa	3	5.2 km/h
2025.11.08 9:58	8.5°C	96%	1016 hPa	1	29.1 km/h
2025.11.11 13:23	6.7°C	97%	1022 hPa	1	6.7 km/h
2025.11.12 15:49	6.9°C	98%	1020 hPa	1	4.5 km/h
2025.11.13 16:01	8.2°C	92%	1021 hPa	1	5.0 km/h
2025.11.14 10:13	5.1°C	96%	1023 hPa	1	3.3 km/h
2025.11.15 10:12	10.7°C	83%	1015 hPa	1	5.9 km/h
2025.11.16 15:50	15.1°C	62%	1010 hPa	1	6.4 km/h
2025.11.17 13:17	19.5°C	47%	998 hPa	1	12.1 km/h
2025.11.18 13:05	7.5°C	55%	1017 hPa	1	5.2 km/h

4.2.2 Lokálisan gyűjtött adatok felhasználhatósága

A lokálisan gyűjtött adatok nagy előnye, hogy a mérési adatok konkrétan a mérés helyszínének adottságait tükrözik, sokkal pontosabban jellemzik a környezeti viszonyokat. Az ilyen rendszerek lehetővé teszik a helyspecifikus döntéshozatalt, különböző folyamatokhoz való időjárási adatok gyűjtésére, figyelhető a mikroklima, vagy figyelhetőek csak egyes időjárási adatok, amelyek fontosak az adott folyamat irányítása szempontjából. Egy rendszerbe akár csatlakoztatható

több mérő egység, amelyek pontosan azon adatokat figyelik és töltik fel az adatbázisba, amelyek az adott folyamat szempontjából fontosnak bizonyulnak. Ilyen módszert alkalmazva még kisebb területekre felbontható a lokális meteorológiai adatgyűjtés, tehát még lokálisabbá tehető, minél lokálisabban végezhető az adatgyűjtés annál pontosabban képes a rendszer a folyamatok irányítására. Különösen fontos a lokális adatok gyűjtése olyan környezetekben, ahol az adatok gyors változása és a pontatlan adatokból eredő döntéshozatal kárt okozhat az eszközökben.

A lokális meteorológia adatok gyűjtése felhasználható például árnyékoló vezérlésére, öntözőrendszerek működtetésére, szellőztetés irányítására, fűtés ütemezésére, precíziós növénytermesztésre stb.

Összefoglalás

Összefoglalásként elmondható, hogy a megvalósított IoT-architektúra hatékony és megbízható valós idejű lokális adatok gyűjtésére, továbbítására és kiértékelésére. A rendszer fő eleme az ESP32 mikrovezérlő megfelelő vezeték nélküli kapcsolat létesítésére képes a Firebase Realtime Database-el valós idejű adatkommunikáció szempontjából. A különböző szenzoradatok gyorsan, és strukturáltan tárolódnak, amelyek később könnyen és késedelem nélkül elérésre kerülnek, és felhasználhatóak folyamatok irányítására.

A lokálisan mért adatok összevetése a hivatalos meteorológiai állomás által mért értékekkel rávilágított, a helyszínspecifikus mérések fontosságára és előnyeire felhasználhatóság szempontjából.

Az ismertetett felhő alapú időjárási viszonyok mérésére szolgáló architektúra rugalmasnak, bővíthetőnek és jól felhasználhatónak bizonyult, alkalmas valós idejű adatgyűjtésre, adatkommunikációra és elemzésre. A munka eredményeképpen levonható, hogy az IoT-ra csatlakoztatott környezeti adatgyűjtő állomások számos előnnyel rendelkeznek, egyes folyamatok elengedhetetlen részét kell képezzék, képesek megkönnyíteni és biztonságosabbá tenni a mindennapi életet a felhasználó számára.

Források

- [1] Simon, J.: Possible Implementations of The Cloud-Based Data-Centric IoT Pilot Platforms For Smart Cities And Agriculture. *Analecta Technica Szegedinensia*, Szegedi Tudományegyetem, Szeged, 2018, pp. 39-44.
- [2] Padmaja, B., Kumar, P., Sai Teja, S.: Google Firebase Based IoT System Architecture. *IJERT – International Journal of Engineering Research and Technology*, Hyderabad, 2021, pp. 1-4.
- [3] Bhavya, A.R., Sudharshan, K.M.: Optimizing Energy Efficiency in Battery-Powered IoT Devices through Hardware Optimization and Voltage Scaling.

- Engineering, Technology and Applied Science Research (ETASR), Bengaluru, 2025, pp. 21769-21773.
- [4] Yüksel ME. Power Consumption Analysis of a Wi-Fi-based IoT Device. *Electrica*, Burdur, Turkey, 2020, pp. 62-70
 - [5] Li, Wu-J., Yen, C., Lin, You-S., Tung, Shu-C., Huang, Shih-M.: JustIoT Internet of Things based on the Firebase Real-time Database. *Proceedings of the 2018 International Symposium on Semiconductor Manufacturing Intelligence (ISMI2018)*, Hsinchu, Taiwan, 2018, pp. 1-5.
 - [6] Domínguez-Bolaño, T., Campos, O., Barral, V., Escudero, C. J., García-Naya, J. A.: *An overview of IoT architectures, technologies, and existing open-source projects*. Elsevier, Coruña, Spain, 2024, pp 1-15.
 - [7] Petracci, R., Culmone, R.: *A Scalable Approach to IoT Interoperability: The Share Pattern*. MDPI Sensors, Camrino, Italy, 2025, pp 1-22.
 - [8] Feng, Y., Hu, J., Duan, R., Chen, Z.: *Credibility Assessment Method of Sensor Data Based on Multi-Source Heterogeneous Information Fusion*. MDPI Sensors, Changdu, China, 2021, pp 1-21.
 - [9] Reiss, P. S.: *Building an Interface for Controlling IoT Devices*. Brown CS Research Technical report, Providence, USA, 2019, pp 1-4.
 - [10] Kusuma, H.A., Yuliani, Suhendra, T., Devendra, D., Setyono, D. E. D.: *Evaluating the Accuracy of BMP280 and BME280 Sensors for Sea Level in a Coastal Environment: A Field Study at Tanjung Siambang Pier*. *Indonesian Journal of Marine Science*, Tanjungpinang, Indonesia, 2023, pp 189-202.
 - [11] Sung, W.-T., Devi, I.V., Hsiao, S.-J.: *Smart Lamp Using Google Firebase as Realtime Database*. *Intelligent Automation & Soft Computing*, Taichung, Taiwan, 2022, pp 967-982.
 - [12] Chen, T., Barbarossa, S., Wang, X., Giannaks, G. B., Zhang, Z.-L.: *Learning and Management for Internet-of-Things: Accounting for Adaptivity and Scalability*. *arXiv preprint*, Cornell University, Ithaca, USA, 2018, pp. 1-15.
 - [13] Republički hidrometeorološki zavod Srbije. (n.d.). *Aktuelni Podaci*. Letöltve: 2025. 11. 18.
<https://www.hidmet.gov.rs/latin/osmotreni/index.php>

Reconstruction and development of a wireless network in the machining hall of an industrial company

Tamás Márk Baross¹ and Attila Rónai²

¹ Óbuda University, Kando Kalman Faculty of Electrical Engineering, Bécsi út 96/b, H-1034 Budapest, Hungary; baross.mark@kvk.uni-obuda.hu

² Óbuda University, Kando Kalman Faculty of Electrical Engineering, Bécsi út 96/b, H-1034 Budapest, Hungary; raszoft@gmail.com

Abstract: When replacing and scaling the wireless network (Wi-Fi) of an industrial auto parts manufacturer, it is important to consider the demands of the present and future network infrastructure. This is due to the rapid development of information technology (IT/IOT) and INDUSTRY 4.0-5.0, as well as developments in manufacturing execution MES systems and, last but not least, the requirements of cybersecurity audits. During the survey, we assessed the status and suitability of the existing system and designed and modeled the new system in accordance with the expected requirements. During the design phase, we took into account the specific conditions and environmental characteristics of the industrial company's hall. We strived to design and install energy-efficient, modern, high-quality, reliable, and high-performance devices in terms of radio data transmission. The management of the corporate group exclusively supports CISCO product range systems, and we can only integrate this manufacturer's devices in our development. This decision significantly narrows down the options, but at the same time makes it easier to select the right devices, as we only need to look for the devices required for development in a group corresponding to one manufacturer's specialization. The physical layout of APs (access points) is essential for ensuring the performance and reliability of wireless networks. We use modern software to document and model the possible and optimal layout in order to provide adequate coverage in the hall. We place a high priority on cybersecurity and aim to minimize potential threats. To this end, we implement modern security protocols to ensure the integrity and confidentiality of company data.

Keywords: Wi-Fi, Industry 4.0, Industry 5.0, Industrial. Cisco

1. Introduction of possible solutions

When replacing and scaling the wireless network (Wi-Fi) of an industrial auto parts manufacturer, it is important to consider current and future network

infrastructure requirements, given the rapid development of information technology (IT/IOT) and the rapid development of INDUSTRY 4.0-5.0 maturity levels, developments in manufacturing and execution MES manufacturing systems, and the requirements of cybersecurity audits. An important consideration in the design process is the specific conditions and environmental characteristics of the industrial company's shop floor. Furthermore, we must strive to design and install energy-efficient, modern, high-quality, reliable, and high-performance devices in terms of radio data transmission. Ultimately, inadequate network infrastructure can directly reduce a company's effectiveness and profitability. "It is important to ensure that the data stored in the central system is protected to the maximum extent possible with the available tools, or to find a solution that does not compromise data integrity and prevent data leaks, breaches, or loss. Furthermore, we must recognize that a corporate support network and the infrastructure that serves it are exposed to significant cybersecurity threats from systems that may originate from the manufacturing network layers." [1] In the following, we would like to present the replacement of an industrial company's existing obsolete wireless network, which is no longer supported by the manufacturer, from planning to implementation. In this article, we aim to outline how we can resolve the existing issues and how we can reconstruct them using current technological tools. According to preliminary plans, we will assess the industrial company's existing and future wireless network requirements, the infrastructure of related devices and resources, the availability of the expected quality, and, with regard to the objectives, we will also examine the industrial devices of manufacturers/suppliers that can be integrated into the system and operated in the long term. The managers of the company's group only support systems from the Cisco product range, so we can only integrate devices from this manufacturer during development. This decision significantly narrows down the options, but at the same time makes it easier to select the desired devices, because we only need to look for the devices required for development in a group that corresponds to one manufacturer's specialization.

2. Wi-Fi network assessment

Our topic specifically focuses on the development of wireless networks in manufacturing areas, which are relatively more specialized due to their complexity and, considering environmental conditions, more complex than the implementation, design and development of a system intended for office use. The total area of the hall is nearly 10,000 square meters. Previously, the wireless network was set up with a total of 26 Cisco AIR-3702e APs. To assess the Wi-Fi network, we use the high-level design (HLD), low-level design (LLD), and site survey documentation prepared for the existing network as a starting point.

Furthermore, due to information security regulations and frequent audits, the customer (company) prepares documentation resulting from system development, as well as analyses and risk assessments necessary for change management. This documentation is not part of this article, as it only covers Wi-Fi development and design, and the documentation of corporate processes is only tangentially related to our topic. As the company has several information security and automotive certificates, only protocols that are identical to or more secure than those of the existing system are acceptable, and they must also comply with Act LXIX of 2024 on cybersecurity legislation applicable in Europe and Hungary. These are based on the NIS2 Directive, which regulates cybersecurity for EU companies, stipulating that information systems must be transparent and that an appropriate information security environment must be established. With regard to radio systems, Decree 7/2024. (VI. 24.) MK defines the requirements and security classes for wireless networks [2]. In accordance with TISAX audits, the extended requirements for network management and control must be examined in accordance with information security regulations. It remains our goal that, in accordance with audit requirements, all available wireless networks should only be connected with device certificates provided by the Enterprise CA and RADIUS server-based authentication processes.

Corporate Requirements:

We would like to highlight some of the company's key expectations and requirements for wireless networks. Design and implementation may only be carried out using Cisco wireless devices and systems. A precise layout plan must be created for indoor endpoints, supported by software-based predictive analysis as well as instrumental testing. The service level such as transmission capacity and security must not fall below the current standard. The device providing the service must be suitable for industrial environments, capable of withstanding temperatures up to 50°C, featuring at least IP67 protection, and built with industrial-grade design. Industrial-grade, low-power, small-area wireless access points may be used, and the equivalent isotropic radiated power (EIRP) of access points and antennas must not exceed Class E2 (2 watts). The solution can be connected to the IT infrastructure using existing 1 Gbps Ethernet CAT6a copper cabling, and Power over Ethernet (PoE+) or a higher-power PoE adapter may be used if the device requires increased power. The system must support 2.4/5/6 GHz Wi-Fi networks and enable the adoption of emerging technologies. During the allocation of 5 GHz frequency channels, 40 MHz channel width should be targeted in the design phase. Centralized control and configuration capabilities are required, along with WPA3 and EAP-TLS support integrated into the existing security ecosystem (e.g., Cisco ISE 3.4). From an energy-efficiency perspective, the system must be designed so that replacing the 26 access points does not exceed current energy consumption, and if possible, the number of APs should even be reduced. The manufacturer's support period and the life cycle of the necessary devices must also be taken into account.

WLC virtualization:

Cisco C9800-CL-K9 virtual controllers (WLCs) will manage the wireless access points. Redundant operation will be implemented by two WLCs in an HA SSO (high availability stateful switchover) configuration, running on separate ESXi hypervisor hosts. The virtual controllers can be deployed in both private and public cloud environments. Multiple hypervisors are supported, and the controller itself is scalable. Only one of the controllers is active at any given time, with the other acting as a hot standby. In the event of an active failure, the secondary controller takes over the active role in such a way that users do not experience any disruption. The two wireless controllers will run within the site; off-site controllers are not involved in management. In this configuration, CAPWAP (Control and Provisioning of Wireless Access Points) channels between wireless access points and the controller are established via the local network. CAPWAP (IETF RFC 5415) between controllers and APs is a standard, interoperable protocol that allows the access controller to manage a collection of wireless endpoints [3]. The protocol channel offers the option of encrypting both data traffic and management traffic. CAPWAP is the basis of Cisco's wireless network solution, LWAPP (Lightweight Access Point Protocol - Cisco's proprietary protocol for centralized control of access points) and DTLS (Datagram Transport Layer Security - a protocol based on TLS that is capable of securing datagram transmission) and UDP. Requirements for using CAPWAP at OSI layer 3 (transport):

- IP addressing
- The CAPWAP protocol must be allowed between the WLC and AP: UDP 5246 (Control) and UDP 5247 (Data) destination ports

User traffic data is embedded in CAPWAP data frames, enabling it to be transmitted between APs and WLCs.

According to the IETF, CAPWAP supports two modes of operation:

- Shared media access control (MAC)
- Local MAC

The most important feature of CAPWAP is its split MAC architecture, where part of the 802.11 protocol family is managed by the CAPWAP AP (typically time-sensitive functions), while the rest is managed by the WLC.

WLC Redundancy and deployed EOL system configurations:

The two virtual WLCs run on the On-Premis side, and the controller outside the company's premises is not involved in management. In this design, the CAPWAP channels between the wireless access points and the controller are built over the local network. Network access for the controllers is provided by the ESXi hypervisor network layer through distribution switches. WLC controllers operate in an HA SSO redundancy model. In this configuration, one member always plays an active role, while the other waits in a standby-hot state. The controllers are dependent on each other, their configurations and databases are synchronized, and

they share a common IP address. Due to the active/standby configuration, AP and client load balancing between the two controllers is not applicable. In the event of a role change, the secondary member becomes active and the APs automatically connect to this member without restarting. There are several conditions for properly configured SSO redundancy, but the most important of all is that both members can see each other on the redundancy interface (Gi 3 / vNIC 3) via an L2 connection. To install WLC controllers, we use the OVA format installer available for download from the manufacturer's website. We will not detail the entire installation process, as most settings contain basic information. The company aims to use low-power, low-consumption indoor units with a maximum transmit power of 30 dBm, i.e. ~1W, for the desired frequencies. The expected frequency band is 2.4-5GHz, but the new system must also provide the option of using the 6 GHz frequency band in the future. The wireless performance of the network is greatly influenced by the type of 802.11-based WLAN topology mode we provide. The system operated the centralized system in infrastructure topology mode. The company previously installed Cisco Aironet 3702e indoor APs with 802.11a/g/n/ac dual-band 2.4-5 GHz internal antennas [4], for which official manufacturer support ended on April 30, 2024. These devices were primarily designed for office use, given that their casing and other components are not fully compatible with industrial environmental conditions. In recent years, we have taken temperature measurements in the hall on several occasions and found that on a day with a temperature of 38-40° Celsius, temperatures of up to 50° Celsius were recorded at a height of nearly 5-6 meters. This temperature had such an effect on the APs that their operation became unstable, and in many cases they lose connection with central service. In some cases, 9-10 of the 26 APs were no longer providing Wi-Fi coverage and were unable to load their embedded system when restarted. Due to the problems outlined above, the company was forced to rebuild its wireless network.

3. Preparing and designing a new system

During the planning of each AP location, a predictive simulation survey (Pre-deploy Apos) and documentation were prepared in advance. During the planning phase, coverage and heat maps were created using the Ekahau [5] system and instrumentation for the frequency bands required at the time. The company provided the necessary hall map and area for the survey. In the Wireless Controller (WLC), i.e., the controller that monitors our Wi-Fi system, DSSS modulation technology was disabled at 802.11b 2.4 GHz, thus avoiding unnecessary and different modulation problems, low speeds, and additional loads on the Wi-Fi network. Furthermore, with 802.11k enabled, clients receive information from nearby APs, allowing them to make quick and optimal decisions regarding roaming. WPA and WPA2 (Wi-Fi® Protected Access) data encryption

protocols have been implemented for wireless local area networks (SSIDs) announced at the company's premises. Taking security requirements into account, Wi-Fi communication for all company devices is authenticated using certificate-based, encrypted communication in accordance with the EAP-TLS 802.1x IETF RFC 5216 standard. This was accompanied by Cisco ISE 3.1 [6], Radius-based AAA (Authentication, Authorization, Accounting) back-end authentication server, which ensures mutual EAP-TLS certificate-based authentication of clients to the network and the establishment of an encrypted communication channel. The system or device initiating EAP-TLS authentication must be capable of supporting the TLS v1.2 and TLS v1.3 encryption protocols specified in the IETF RFC 8446 [7] standard. The EAP-TLS access protocol is one of the most secure authentication methods, as it is resistant to man-in-the-middle attacks and other forms of network intrusion. At the 2024 Cisco Techtorial conference in Budapest, following the presentations and professional discussions held there, we briefly outlined our experiences and problems to the experts presenting at the event. The manufacturer's representatives suggested that we try out a new, heavy-duty device that is suitable for stable operation in an industrial environment and to which high-gain and directional antennas can be connected. They promised to send us a test device for a few weeks so that we could learn and experience the possibilities offered by the new AP, as well as perform measurements according to environmental conditions. Types of test equipment provided by Cisco:

- 1 Cisco IW9167E Heavy Duty Access Point [8]
- 2 Cisco AIR-ANT2513P4M-N dual-band polarization directional antennas

The testing project was implemented after the necessary internal approvals were obtained, and we installed the testing equipment on a temporary basis in a location and substructure that we considered ideal, thereby minimizing the downtime of the productive system. The physical installation and mounting on the ceiling was carried out by the company's internal maintenance department's building operations team, as only our employees with the appropriate permits and licenses were able to install the equipment at a height of nearly 5 meters using a self-propelled aerial work platform. Cisco provided the necessary installation materials and connection cables. We solved the Cat6a copper RJ-45 Ethernet network connection by suspending a nearby AP and temporarily rerouting its network cable. I determined the layout instructions for the physical installation of the antennas and the test AP, as well as the orientation of the antennas. I set the orientation of the antennas, i.e., the angle enclosed by the ceiling, at 15°. We did this so that the signal dispersion shown in the simulation would be comparable to the performance of the old AP, and so that the signal dispersions of the antennas would overlap only to a very small extent. We connected the four-port polarization antennas according to Cisco's official installation guide. We connected the AP's red connection ports to the left antenna and the blue ones to the right antenna. We solved the AP's power supply with a factory power supply for the Cisco IW9167, as we did not have a switch port providing 802.3bt/UPOE

voltage. We connected the RJ-45 Ethernet interface to the IT network via a factory block connector using a Cat6a flexible patch cable. The problem was that officially, AIR-3702e APs could only be operated on WLC version 17.4.x, and the new devices received for testing were only supported by WLC versions 17.9.4 and above [8]. As a result, we installed a stable version 17.9.6 for testing purposes in a separate data center test VLANs suitable for the purpose. The WLC installation was the same as the previous installation procedure, with the only difference being that the management IP address was different and no redundant installation was required for the test operation. The configurations, policies, WLAN SSIDs, RADIUS, and FLEX were identical to the settings in the production system without exception. We reprogrammed the switch port configuration and management VLANs connected to the test AP to the new WLC network segment, and after successfully downloading the new software version (in about 15 minutes), the test AP was available within a few minutes.

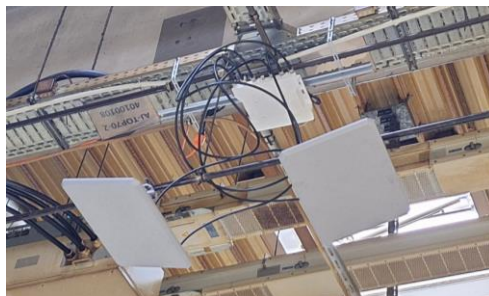


Figure 1. Test device equipped: Cisco IW9167E and two AIR-ANT2513P4M-N dual-band antennas

4. Planning phase

We performed our measurements using Ekahau (version: 10.4) software, provided by our company's network solutions partner, as we did not have a software license (this would have required a significant financial investment on the part of our company, so this was the only way to perform the measurements). The measurements were performed at 2.4 GHz - 5 GHz frequencies by physically walking through the existing map. On the WLC, we set the parameters for our first scan to 5 GHz 100.104 channels with a channel bandwidth of 40 MHz and the maximum available signal strength (which in this case was 27dBm). The following shows how the measurement heat map developed and how much coverage the tested AP provided at 5 GHz. One test AP was able to cover approximately 50% of the entire hall with a signal of sufficient quality at maximum signal strength. We also obtained good results among the manufacturer's equipment located in the hall. At the same time, the 2.4 GHz 20 MHz band was also measured, which also covered nearly 50% of the hall. The

maximum performance measurements showed very important and useful results for us, as well as the reference values of the test AP in a given case and how we can use these properties in line with our plans. We then scaled back the performance to nearly 50% because it provides a useful reference value for our placement concept. I did not change any other existing parameters in the 5 GHz settings, only the maximum transmit power of the AP. In summary, with the AP properly oriented, even at a lower power than the maximum, it is capable of covering one-third of the hall at an adequate level. The Cisco Catalyst IW9167E high-performance access point AP recommended by Cisco's representative met our requirements, taking into account the following parameters [8]: The Catalyst IW9167 series is specifically designed for heavy-duty industrial use, featuring a construction that is resistant to shock, vibration, and extreme temperatures. With support for industrial protocols, the device provides modern, secure, and highly available wireless connectivity, including compatibility with Wi-Fi 6 and the 6 GHz frequency band. Its dual Multigigabit Ethernet ports enable speeds of up to 5 Gbps, while the eight N-type antenna ports allow the connection of Cisco factory external antennas. The device operates effectively within a wide temperature range, from -40°C to $+70^{\circ}\text{C}$, and can withstand $+85^{\circ}\text{C}$ for up to 16 hours. It is certified to IP66 and IP67 standards (EN/IEC 60529), ensuring protection against dust and water. Wireless performance is enhanced by 4×4 downlink MU-MIMO technology with four spatial streams on both 5 GHz radios, as well as maximum ratio combining (MRC) and 802.11ac beamforming. It supports 20, 40, 80, and 160 MHz channels, achieving a physical data rate of up to 3.4 Gbps (with dual 4×4:4SS at 80 MHz). Packet aggregation methods A-MPDU and A-MSDU for both transmit and receive ensure efficient data handling. The device complies with 802.11 DFS requirements, supports CSD functionality, and includes WPA3, the latest Wi-Fi security standard. The advantages of the Wi-Fi 6 standard include higher and more reliable data transfer speeds, more channels, energy efficiency, and, last but not least, more effective protection and data traffic encryption in terms of security. In addition, the AP supports MESH technology, where clients and active Wi-Fi systems can communicate with each other on a shared radio frequency network. The advantage is that network data traffic can be handled without loss in a given area, even with multiple APs and/or through APs. Using the company's existing infrastructure and the parameters of the device received for testing purposes, we used the Ekahau 10.4 Wi-Fi planning system to create a predictive heat map. It was important for us to create a physical topology that would cover the entire area of the hall and ensure fault-tolerant availability in case an AP was forced to shut down due to hardware failure. Last but not least, we had to take the company's budget into account, strive for the absolutely necessary coverage, and consider the power consumption of the APs to be installed. For reasons of economy, we should use the existing Cat6a copper-based Ethernet RJ-45 free endpoints, and if necessary, we can also use the network connections of the existing old APs. The question arose as to how suitable the POE+ switches on the existing Ethernet Access side would be for powering the new system. The

current RJ-45 network topology does not allow for the power supply of UPOE devices, so depending on the number of wireless network access points (APs), we need to purchase UPOE adapters or UPOE switches. We were able to replace the power supply by purchasing temporary UPOE (Power over Ethernet, 802.3bt, 60 watts) adapters, as the available switches are capable of providing POE+ (Power over Ethernet, 802.3at, 30 watts) power. In the following predictive plans, we focused on 5 GHz frequencies because this is expected in the long term and in terms of the current equipment pool. During the initial planning phase, a significant number of APs were planned, and macrocell coverage is not complete; there are also places where structures taller than 5 meters limit coverage signal levels. In our opinion, the plan below needs to be supplemented with two more APs, as coverage within the hall is uncertain and the bands between tall buildings are unusable. In the case of tall buildings, it is important that the handheld barcode readers used by employees working their function properly. Based on the above, we concluded that the hall should be divided into six cells, resulting in a total of seven coverage areas. We paid particular attention to the coverage to be established in the area of tall buildings and possible solutions. We considered the internal building within the hall as a separate (macro)cell. After the division, we concluded that the cells should be supplied from two directions, thus optimally reducing the number of APs and setting the coverage signal levels to approximately 60-70% of the transmitter power. We place the APs on the horizontal axis of the entire hall, and with antennas directed at approximately 40-45°, we can cover the cells with an adequate signal, creating a redundant pair for that area. The advantage is that each cell is served by two APs with one antenna each, and in the event of an AP failure, we can continue to ensure macrocell coverage manually or automatically. In our opinion, a total of nine APs fully cover the service area, thereby reducing energy consumption and increasing security and high availability. As planned, we put together a sample of the purchased devices with the company's building operations department. We took into account Cisco's recommendation that the two directional antennas should be at least 1.5 m apart horizontally and rotated at a minimum of 90° relative to each other [9]. We connected the coaxial cables of the antennas to the AP with appropriate bends and fasteners. We connected the antennas in the same order as we did with the test AP. The vertical tilt angle of the antennas was gradually changed between 15° and 85°, and I finalized it based on the reference data obtained during the measurement. The RJ-45 patch cable was connected through an airtight block connector so that the AP's internal electrical system would not be exposed to environmental stress.



Figure 2. Installing and commissioning the first AP

The next AP setup was different in that the distribution and connection points of the opposing antennas were reversed, i.e., the opposite of the first one. This was good for us because it allowed us to apply different settings per antenna/slot when distributing Wi-Fi channels.



Figure 3. Installing and commissioning the second AP

I created a new radio frequency profile (RF profile) for the APs installed in the new hall for the 5 GHz frequency band, called Production_5 GHz. This was not necessary for the 2.4 GHz band, because I derived the previous settings and they will not change in the future. By default, the new AP is installed in outdoor mode, and we would like to keep it that way because the goal is for it to operate in the 5 GHz UNII-2C and UNII-2-Ext (Unlicensed National Information Infrastructure) bands between 100 and 144. For the APs installed in the new hall, we created a new radio frequency profile (RF profile) for the 5 GHz frequency band called Production_5 GHz. This was not necessary for the 2.4 GHz band because we derived the previous settings, and these will not change in the future. By default, the new AP is installed in outdoor mode, and we would like to keep it that way because the goal is for it to operate in the 5 GHz UNII-2C and UNII-2-Ext (Unlicensed National Information Infrastructure) bands between 100 and 144. We couldn't do the setup because the WLC rejected it with an error message and automatically changed the APs' Slot2 40 MHz channels to 20 MHz.

AP neve	Slot1	Slot2
1. AP	100-104	108-112
2. AP	100-104	108-112
3. AP	132-136	100-104
4. AP	132-136	100-104
5. AP	100-104	108-112
6. AP	100-104	108-112

Figure 4. Manual channel allocation on 5Ghz 40Mhz band overlapping cells

The manufacturer acknowledged that, according to point 4.2.3.2.2 and Table 2 of an old ETSI regulation [10], the power of the second antenna at 5 GHz must not exceed the power of UNII-2a, but this is no longer included in the newer regulation. Following further consultations and negotiations, we agreed that Cisco's programming team would treat this as a bug, i.e. a system error, in the following registry list, and that they would be willing to fix this problem to our satisfaction:

A Cisco Bug availability:

<https://bst.cloudapps.cisco.com/bugsearch/bug/CSCwo41248>

Therefore, we chose the following temporary solution. The UNII-2a channels consist of 40 MHz channels 52-56 and 60-64, and the maximum available transmit power is 19 dBm. We did not plan to maximize the power of the UNII-2c channels anyway, so I set the maximum power of all Slot1 and Slot2 5 GHz antennas to between 19 and 21 dBm. This allowed me to achieve nearly identical coverage and transmitter power on both antennas of the APs in every cell.

AP neve	Slot1	Slot2
1. AP	100-104	52-56
2. AP	108-112	60-64
3. AP	60-64	108-112
4. AP	52-56	132-136
5. AP	100-104	52-56
6. AP	108-112	60-64

Figure 5. Temporary channel allocation on 5Ghz 40Mhz band overlapping cells

We tested the wireless network after installation using the following procedures. First, we turned off all old AP radio transmissions in the cell where we performed the tests. Using WLC, we checked whether any interfering devices were affecting the performance of the cell. We selected at least four critical locations in the cell we chose. For example, we performed software and speed tests with laptops among extensive manufacturing equipment. We continuously monitored changes in signal levels, network availability, and speed. In terms of software, we used Iperf and Speedtest applications to test speeds, and I used NetSpot and Wi-Fi Analyzer software to analyze the network. We used the following company devices for testing: laptop, industrial PC, barcode scanner, mobile phone. We also plan to perform Ekahau thermal mapping measurements, but only if Cisco system errors can be completely repaired. Finally, we disconnected all AIR-3702e AP radio traffic and put the new APs into live service. We visited several areas in the hall and asked for the opinions of employees who regularly use Wi-Fi devices in manufacturing processes. Their experiences and feedback on the new system were extremely positive, with no significant problems reported. The introduction of Wi-Fi 6 technology provides visibly higher data transfer rates and lower latency. Thanks to high-gain antennas, coverage of the area allows for more efficient use, reducing dead spots and improving radio signal quality. Better signal strength and stability enhance the user experience, especially in critical areas where it is challenging to build an adequate wireless network. The newly built wireless network can be easily upgraded if the physical dimensions and layout of the hall change. The locations of antennas and APs can be changed, positioned, and relocated as needed. Based on existing plans and experience, they can be planned in advance, and the capacities required for the investment can also be predicted. The device has a life cycle of at least 8-10 years, which allows for security improvements and the introduction of new protocols. The company does not currently have 6GHz devices, but the current system allows for conversion and frequency access. If higher bandwidth is required, the AP can also be connected to an optical network, as it has an SFP+ interface, so theoretically, data transfer

speeds of nearly 10Gbits can be achieved. If the company purchases IoT and automated equipment, the AP also supports high-availability MESH technology. To ensure network security, we integrate additional security systems to detect newly discovered vulnerabilities and intrusion attempts in a timely manner. Last but not least, we are exploring the possibility of integrating artificial intelligence-based systems to enhance the security of the new system.

Conclusions

In this article, we have presented how to prepare for the reconstruction of an industrial company's wireless network and implement it in accordance with expectations and plans. We have described and researched the possible methods and related professional experiences. We have modeled and tested the new system using state-of-the-art testing equipment. We have performed numerous measurements in the industrial area and used them to design the optimal layout of the devices. During the physical implementation of the wireless network, we specified the technical parameters required for the equipment and supervised the processes throughout. We designed the performance of the new network, which we adjusted and documented according to the circumstances. We sought a solution to a system error from Cisco so that the system could be put into live operation as soon as possible. We made the transition smoothly: users did not notice any network or service outages. The network is stable, reliable, provides full coverage of the hall and is redundant where necessary, and we have also managed to reduce energy consumption by reducing the number of APs. We have met both current and future expectations by introducing new technologies and security protocols.

References:

- [1] M. T. Baross and A. Rónai, *Current methods of remote access to automotive manufacturing systems and security risks for the IT Data Center*. [Online]. Available: <https://tinyurl.com/4ymb8an5>.
- [2] Nemzeti Jogszabálytár, 7/2024. (VI. 24.) MK rendelet a biztonsági osztályba sorolás követelményeiről, valamint az egyes biztonsági osztályok esetében alkalmazandó konkrét védelmi intézkedésekről. [Online]. Available: <https://njt.hu/jogszabaly/2024-7-20-7G.3>.
- [3] P. Calhoun, M. Montemurro and D. Stanley, *Control and Provisioning of Wireless Access Points (CAPWAP) Protocol Specification*. [Online]. Available: <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc5415>.
- [4] Cisco, *Cisco Aironet 3700 Series Access Points*. [Online]. Available: <https://www.cisco.com/c/en/us/support/wireless/aironet-3700-series/series.html>.

- [5] Ekahau, *Introducing Survey 2.0 and Pro 10.4*. [Online]. Available: <https://www.ekahau.com/blog/introducing-survey-2-0-and-pro-10-4/>.
- [6] Cisco, *Supported Protocol Standards, RFCs, and IETF Drafts*. [Online]. Available: <https://tinyurl.com/ykxkvbn2>.
- [7] Internet Engineering Task Force (IETF), *The Transport Layer Security (TLS) Protocol Version 1.3*. [Online]. Available: <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc8446>.
- [8] Cisco, *Cisco Catalyst IW9167 Heavy Duty Series Data Sheet*. [Online]. Available: <https://tinyurl.com/mrxf5szz>.
- [9] Cisco, *Cisco Catalyst IW9167E Heavy Duty Access Point Hardware Installation Guide*. [Online]. Available: <https://tinyurl.com/5nvmrvnv>.
- [10] ETSI, *ETSI EN 301 893 V2.2.0 (2023-11)*. [Online]. Available: <https://tinyurl.com/yc2czmh6>.

Embedding passive electronic components into 3D printed structures using FDM technology

Dominik Bozsó¹ and Márk Tamás Baross²

¹Óbuda University, Kando Kalman Faculty of Electrical Engineering,
Tavaszmező utca 17., 1084, Budapest, Hungary; bozsodominik@stud.uni-obuda.hu

²Óbuda University, Doctoral School on Safety and Security Sciences, József körút
6. III., H-1088 Budapest, Hungary; baross.mark@uni-obuda.hu

Abstract: In today's rapidly evolving world, industries are constantly seeking innovative new solutions to improve the functionality of their products, while also trying to reduce manufacturing costs and optimize prototype production time. During my university years, I believe that this is the perfect time to research these technologies, as it will help my professional development and allow me to gain a wealth of experience that I can put to good use in the future. The primary goal of my research is to develop a technological basis within 3D printing technology for integrating basic passive electronic components into the 3D printing process using FDM technology. At the same time, and perhaps the next big challenge, is the integration of these 3D-printed elements and components with products from other industries. That is why I believe that combining 3D printing with electronic components, such as passive electronic components, and ICs into the carrier structure (rather than putting them in the traditional way) offers significant advantages, as it allows manufacturers to create more compact, durable, and aesthetically pleasing products. To this end, I need to conduct research in the field of material compatibility, as I need to examine the materials most commonly used in 3D printing, which include PLA, PETG, and conductive filament, and how these materials affect temperature changes, assembly difficulty, embedding techniques, and component integrity. For later practical implementation, my project focuses on comparing and testing different embedding methods. These include, for example, interrupting the printing process to insert components (pause and insert), designing assemblable elements, and using electrically conductor filaments. These methods not only focus on passive components (resistors, capacitors, LEDs), but also analyse embedding processes, which are an important part of developing this technology. Overall, the research involves a thorough comparison of component parameters (e.g., LED brightness, actual resistance value after embedding) to draw the appropriate conclusions. The results of the analysis may contribute to the manufacture of complex, intelligent, small-batch products for everyday use, with electronics integrated into their mechanical structure, bringing us closer to the future of fully printable electronic devices.

Keywords: 3D printing; electronics; embedding; FDM

1 Introduction

In today's rapidly evolving world, industries are constantly seeking innovative new solutions to improve the functionality of their products, while also striving to reduce manufacturing costs and optimize prototype production time. The primary goal of my research is to develop a technological basis within 3D printing technology for integrating basic passive electronic components during the 3D printing process within the framework of FDM (Fused Deposition Modeling) technology. Additive manufacturing, better known as 3D printing, especially the inexpensive and widely used FDM technology, has transformed product design and manufacturing, enabling the rapid creation of complex geometries in a cost-effective manner. At the same time, and perhaps the next big challenge, is the integration of these 3D-printed elements and components with products from other industries. That is why I believe that combining 3D printing with electronic components, such as passive electronic components, and ICs into the carrier structure (rather than fixing them in the traditional way) offers significant advantages, as it allows manufacturers to create more compact, durable, and aesthetically pleasing products. To this end, I need to conduct research in the field of material compatibility, as I need to examine the materials most commonly used in 3D printing, which are PLA, PETG, and a few other filaments, to see how these materials affect temperature changes, assembly difficulty, embedding techniques, and component integrity. For later practical implementation, my project focuses on comparing and testing different embedding methods. These include, for example, interrupting the printing process to insert components (pause and insert) and designing assembleable elements. These methods not only focus on passive elements (resistance, capacitor, LED), but also analyze embedding processes, which are an important part of developing this technology. Overall, the research involves a thorough comparison of component parameters (e.g., LED brightness, actual resistance value after embedding) to draw the appropriate conclusions. The results of the research may contribute to the manufacture of complex, intelligent, small-batch products for everyday use, with electronics integrated into their mechanical structure, bringing us closer to the future of fully printable electronic devices.

2 Additive manufacturing and the basis of FDM technology

Additive Manufacturing (AM) as a concept was already known in the 1980s and 1990s, as manufacturing processes in which the production of a given product or process took place layer by layer already followed this basic principle. Of course, this term was not used precisely at that time, as the concept of additive

manufacturing only became a standard term in the 2000s, when the first industrial forms of 3D printing appeared, which became increasingly popular in the following years for both industrial and hobbyist use.

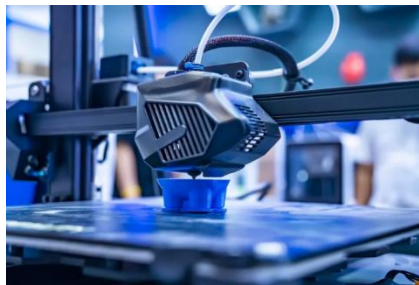


Figure 1. Additive manufacturing

Source: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=23900>

Compared to classic methods such as injection molding and CNC machining, it offers numerous advantages, from manufacturing costs to speed and quality. I would like to highlight the case of small-volume production, where the design and manufacture of molds used in the injection molding process is extremely costly, which is not a cost-effective solution for small batch production. This contrasts with 3D printing, where it is not necessary to manufacture the aforementioned molds, as the finished product can be produced layer by layer. Considering these aspects, it is easy to conclude that it is much more difficult to enter the market with a mass-produced product due to the favorable prices and online marketing of various East Asian companies. In contrast, 3D printing offers a significant advantage in rapid prototyping and customizable products, which makes it easy to enter the market. With the right digital platforms, 3D printing opens a new world for users, allowing them to obtain detailed, customized products, not to mention geometric shapes that cannot be achieved with other manufacturing methods. As part of this evolution, recent advances in functional 3D printing (such as multi-material printing, printed electronics, and printed optics) are the first steps toward the digital specification and manufacturing of fully interactive devices. These advances promise that interactive devices will eventually be highly customizable to the needs of the individual or task in a way that is not possible with traditional mass production techniques. Among the various additive manufacturing methods, powder bed fusion (PBF) processes, including laser processes, are essentially based on controlling solid-liquid and liquid-solid phase transitions in individual layers of the process. Powder bed fusion technology is a relatively expensive additive manufacturing technology. It is mostly used in industrial and commercial applications. In addition to rapid prototyping, metal- and polymer-based processes can also be used to manufacture end-use parts. To understand powder bed fusion processes, we need to know the characteristics of the powder, the changes in its

liquid and solid phase transformations, and how it behaves to certain thermal cycle changes, which is why this is a much more complex and difficult topic to digest. In addition, as I mentioned, it is very costly and not necessarily suitable for small-scale prototype production, but rather for the manufacture of a final product, as we can produce samples at a much lower cost using FDM technology, and then, once we are satisfied with the functionality and design of the product, we can proceed to PBF printing if necessary. The other additive manufacturing process is FDM printing, an extrusion AM process that uses thermoplastics. Here, unlike in the powder bed process, the object is not placed in any other medium but is built up layer by layer on an object table using only the material currently in use. The filament itself can be purchased in roll form, and this thin filament is loaded into the 3D printer and softens when the preset temperature is reached, and the extruder head begins to build the object layer by layer thanks to its three-axis movement. To ensure that printing is smooth and continuous, the softened filament is cooled with fans so that the next layer can be built on top of a layer of the right hardness. The structure within the layer can be customized depending on the desired result. For example, if the external appearance of the printed object is important, the outer layer must be perfect. This can be achieved by first building the inner part of the layer and then the outer part. However, if we want to create a mold with precise dimensions, for example, then the precise dimensions are much more important, so building from the outside in is recommended. These steps are necessary because the soft filament extruded through the nozzle naturally has a physical diameter, even if it is very small, and during construction, this filament will be filled in with numerous layers. These steps are necessary because the soft filament extruded through the nozzle naturally has a physical diameter, even if it is very small. During construction, when filling in the numerous layers, these filament strands can push each other apart when hot and change the dimensions of the object. This is why it is very important to take this into account when designing a hole, for example, and to design them a few hundredths or tenths larger so that we actually get the hole with the designed diameter in reality. After learning the basics of FDM technology, it is clear that this solution is the most widespread, as it allows objects to be printed with the least amount of energy and with high precision, provided that the correct settings are used. In addition, when considering the post-processing work, this is also the most practical printing method, as there is no need to clean the object from dust in the case of powder printing, or from the large amount of resin residue in the case of resin printing, which not only concentrates on the object, but also on cleaning the printer. It is also important to mention the wide range of filaments available, as depending on the application, everything from easy-to-print, environmentally insensitive filaments to higher temperature resistant and flexible materials are available in a wide range of colors, so from this point of view, it is clearly the best choice in terms of convenience, cost-effectiveness, and knowledge for hobby and small industrial applications. Of course, like all technologies, it has its disadvantages compared to other solutions. These include resolution quality, which is due to the

physical dimensions of the filament mentioned above, as well as the nozzle diameter. Due to these limitations, other 3D printing technologies, such as resin and powder printing, have much higher resolution capabilities, meaning that they can be used to print objects and parts with much greater detail and finer features. In addition, since it is built up in layers, the layer lines are visible to some extent, although current models are capable of printing with a layer thickness of 0.08, where this phenomenon is no longer visible at all, but regardless, they are still there, and our model is built up layer by layer. This leads to the last major disadvantage, which is weak resistance to mechanical stress due to the anisotropic arrangement. Of course, this can be improved by increasing the layer thickness and wall thickness, as well as by correctly determining the printing arrangement so that the layers are perpendicular to the forces acting on the larger areas, thus increasing the resistance of the given parts several times over.

3 Passive components in 3D printed structures

With the advancement of 3D printing technology, the primary goal of being able to manufacture more complex 3D printed parts has already been achieved, and the next step is to further develop this technology. From a mechanical point of view, the integration of various reinforcements, stronger materials, and metals into the internal structures of plastic printed parts began to spread. I believe that the next step is to properly integrate electronic components into the printing process with a solution that replaces the concept of external covers, boxes, or caps as we know them today and creates a complex structure in both directions. However, achieving this process requires a great deal of research work to ensure that the electronic components and the plastic casing surrounding them can be properly combined to create the best possible combination of compact design, spatial integration, fast and convenient manufacturing, and maximum utilization of factors affecting electronics. After selecting, testing, and examining the appropriate components, the next largest and most important part of the project can begin: 3D printing and embedding. However, this process is preceded by an extremely long and, in terms of usability, manufacturability, quality, aesthetics, and functionality, extremely important 3D design of 3D printed forms, the housings of electrical components. This process is not as simple as it sounds at first, as it must comply with a great many factors and variables. In addition, several critical technological challenges complicate the process, both from the printer's point of view and from the point of view of the components. The first phase involves creating the approximate dimensions and shape of the part, which I do not create directly in the design software, but rather by designing a sketch of how I envisioned each given element. Once this is done, we can begin to determine the limits and accuracy of our own 3D printer, as each printer has a different level of accuracy. As I mentioned in chapter two, the molten filament flowing through the nozzle, among other things,

naturally has a physical extent, and as we build the layers, the dimensions of the cavities and holes calculated in the design software may differ from the actual model. Therefore, it is worth printing smaller sample pieces first with the exact models of the given parts, then scaling them up and down with their offsets to achieve the perfect fit for our electronic component. Of course, we are not talking about centimeters here, but a few tenths or hundredths of a millimeter, but these size differences are also of significant importance for a precise fit. It is best if the fit is a little tight, so that the component almost must be snapped into place. Of course, this also depends on the design and casing of the component, which I will discuss in Chapter 4. The design part also includes the wiring within the 3D printed element and, as a result, the physical placement of the wires in the 3D designed component, as well as the design of the connections, which will allow us to connect two elements both physically and electronically. The printing and embedding phase are preceded by the slicing process, which is performed using the 3D printer software. This is where you need to configure all the important settings related to printing, which I will detail below. These settings include the selection of the printing material, print quality, layer thickness, printing of inner and outer walls, setting the thickness of the object wall, determining the fill rate, placing various printing aids (supports), print speed, and additional settings, mainly for preparing color printing with multiple filaments.

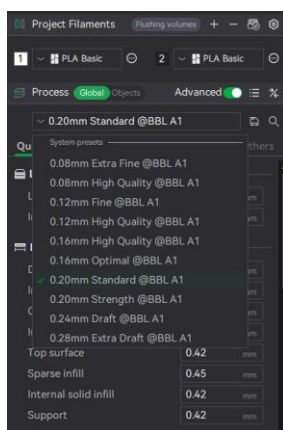


Figure 2. Bambu Studio settings

Source: Self-edited

When selecting printing materials, most slicer programs already have predefined profile presets, and this is also the case with Bambu Studio, which I will be using for this project, as the printer is also a Bambu Lab brand printer. Of course, these can be edited if one of the preset functions does not suit our needs, or if we want to adjust the printing temperature. We can also adjust the print quality and, with it, the layer thickness. If we want to print a more accurate, aesthetic, and detailed

part, it is worth working with the smallest possible layer thickness, which in my case is 0.08 mm, because at this layer thickness, the lines found in the layers built on top of each other almost disappear, and we can also print a thin part in the Z direction completely, and the slicer will not skip it because it is basically not as thick as the layer thickness we are working with. The settings profiles are shown in Figure 2. The fill rate and wall thickness are also very important settings, as they allow us to directly change the resistance of our object, its tolerance to physical impacts, such as strength, protection against twisting, resistance to tensile and compressive forces, and transparency. Setting up support elements can also contribute significantly to achieving a printable form for individual parts, as the majority of printed parts do not lie completely flat on the printer bed due to their design. So, when printing not on the work sheet but "in the air," it is necessary to enable the support option, which automatically generates this support structure when the set threshold (x°) is exceeded, so that the filament can be printed onto a surface, as shown in Figure 3 below.

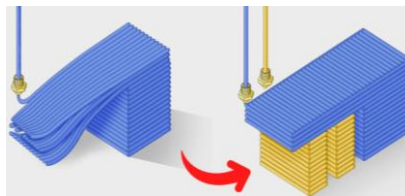


Figure 3. The importance of support

Source: <https://tinyurl.com/yy8rcp3y>

As a final step, I would like to mention an important setting option that edits the G-code, which is the format that the printer reads directly. This setting is none other than the Stop and Go function, which allows me to easily select the layer where I want to stop printing. During this process, it will be possible to insert electronic components, wiring, and connectors into the printed element that has been stopped. However, it is important to note that this step is not easy and requires great caution, as neither the printed object nor the work surface can be removed from the printer, otherwise the component would shift during insertion, causing a faulty continuation. In addition, with the stop and go function, the printer keeps the worktable warm so that the printed component does not separate from its surface, which is another reason why the otherwise replaceable work sheet cannot be removed. Printing is also complicated by other critical challenges. First, I would mention the problem where not only the part being printed can be damaged, but also the more expensive 3D printer, which is stopping printing at the correct layer. It is worth designing the inserted external part so that it does not rise above the remaining layers, as the printer continues printing based on the G-code and will not detect the extra part we have inserted, which can cause a nozzle collision accident, resulting in serious damage to both the print head and the control motors and their controls. Furthermore, it is also necessary to examine

how much critical temperature change (thermal shock) the electronic components to be installed can withstand, since an embedding process cannot be considered successful if, although the result has been physically achieved externally, physically successful, but is not functional when tested, as the thermal shock has destroyed the electronic component.

4 Testing of electronic components and methods of their embedding

I would like to mention an important electronic component and examine it separately in advance for my future project, which would be the LED, as this component will certainly play a role and I would like to integrate it into my 3D printed elements as a module. The LED has two important parameters that are key characteristics for me to ensure that it is suitable. The first is heat dissipation, as, like resistors and most electronic components, they generate heat that needs to be dissipated. Usually, these components dissipate this heat through their surface into the surrounding medium, However, in my case, in striving for the most precise, stable, and premium solution, there will not be an air medium at a level where heat dissipation can occur properly, so it is important for me to examine how they behave in different temperature ranges, whether for a short or long period of time. To this end, I took measurements where I designed and printed various elements into which I installed the LEDs and examined over a longer period of time how their temperature and other important parameters change, which in my case are light scattering and color modification. Therefore, to measure the latter property, I designed the 3D-printed sockets to be either completely closed or open in terms of installation, so that I could examine both heat dissipation and light scattering and color change. The Figure 4 shows the difference between the two sockets, which illustrate two different thermal management solutions. The one on the left is an open-construction socket, allowing the LED to dissipate heat directly into the ambient air, while the one on the right is a completely closed structure, where heat dissipation is achieved by conduction through the PLA cover, heating it up, which allows for slower heat dissipation due to the high thermal resistance of PLA, which can increase the operating temperature of the LED, leading to a reduction in its service life. In the open design, the LED shines brightly in its own range, while heat dissipation is also more efficient than in the closed solution on the right, where color and intensity changes are clearly visible. I performed the test with white PLA and closed the socket with a 0.16 mm layer thickness surface in the enclosed structure, which is still well within the range that can be illuminated.

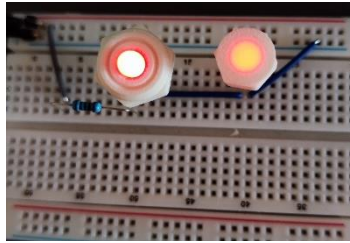


Figure 4. Printed LED socket - light diffusion and color change

Source: Own image

5 Material compatibility from the point of view of electronic components

Successful integration means not only embedding electronic components, but also creating a unified, cohesive structure. To achieve this goal, this chapter focuses on comparing different 3D-printed support structures, thereby facilitating the selection of the appropriate filament and improving the quality of adhesion between the polymer matrix material and the electronic components. First, I will describe PLA (polylactic acid) and its properties in detail. PLA is the most widely used filament in 3D printing, particularly in extrusion-based printing. It is biodegradable and has a negligible impact on the environment. However, there are limitations to its use that need to be considered. These include its impact resistance, mechanical weakness, and heat resistance, which is one of its most defining characteristics and a key factor in choosing it for a project. PLA is a compostable material made from plant starch, making it excellent for recycling. However, it is not only this parameter that makes it so popular, as in terms of printability, it is by far one of the best and easiest filaments to work with. This is due to its low-temperature printing capability and, as a result, its low warping tendency. Of course, the material also has its shortcomings, such as the low heat resistance mentioned above, which can be a decisive factor in the outcome of most projects. In addition, the material has a rigid structure and is therefore not capable of plastic deformation. Overall, this filament is therefore the perfect choice for producing prototype models, as it allows parts to be created cost-effectively with perfect printing and scaling, which can then be used as the basis for the final product. The next material to be examined is PETG (Polyethylene Terephthalate Glycol), whose name may be familiar from PET bottles. The name is not a coincidence, as it is a modified PET material, which is strong and tough, so it is not as brittle as the PLA, and is therefore capable of minor deformation, but will naturally break after a certain amount of stress. It has better heat resistance

parameters than PLA but is not outstanding among the filaments used for 3D printing. Based on its properties so far, it may be a very good choice from an embedding point of view, but when compared to this project, the more sustained high printing temperature is not advantageous for various electronic components. In addition, PETG filament requires complicated preparation, as it must be stored in a dry place with low humidity, otherwise it will not print properly with this raw material. At this point, it begins to fray, as shown in Figure 5, and if the moisture content is high, we get a component with an impure layer structure, as shown in Figure 6, which visibly forms a single unit, but the layers separate much more easily due to the high humidity.

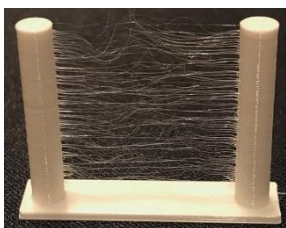


Figure 5. PETG stringing example

Source: <https://shorturl.at/OGjep>

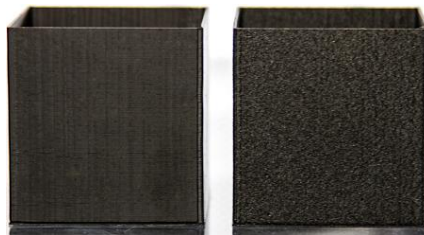


Figure 6. PETG high humidity

Source: <https://shorturl.at/nGpS5>

The next filament worth mentioning is ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene), which may be familiar from the plastic injection molding industry, whether in the world of building blocks or car parts. The raw materials are naturally compatible with each other, but ABS filament is optimized with additives for 3D printing, while ABS granules used for injection molding are optimized with additives necessary for mold filling. A significant advantage over the previous two filament types is its high heat resistance, which can reach up to 80°C with proper handling. In contrast to the two filaments mentioned above, however, it is much more challenging to print with, as it is highly prone to warping, which can cause serious problems in precise embedding processes, and toxic gases are also produced during printing, which is why it is necessary to print in a closed printing space, also in order to maintain a higher temperature range. This characteristic and the enclosed space are also not favorable factors from the point of view of electronic components.

The importance of different temperatures has already been mentioned in relation to different filament types, both from the point of view of printing, embeddability, and the use of the end product. Using the filaments mentioned in the previous chapter, I have created a summary table showing their heat distortion temperatures, which indicate the temperature at which the material softens under a

given load to such an extent that it leads to deformation or deflection. The table is shown in Figure 11, which shows that PLA becomes plastic at around 55 °C, while ASA filament, which has the highest heat resistance, only begins to deform at around 90 °C. In terms of mechanical load capacity, PLA has the most rigid properties, so it can withstand high forces, but it is not capable of deformation, so it breaks easily. In contrast, ASA and ABS are much more durable and capable of some deformation without breaking immediately, but even a smaller force than with PLA is sufficient to cause breakage. I would classify PETG filament between the two limits, as this material is capable of much greater deformation, so it ranks below ASA and ABS in this respect, but the layers do not separate immediately, they stretch. The load-bearing test results are shown in Figure 8, where PLA was able to withstand a load of 70 kg horizontally, which means perpendicular to the print layers. So here I did not test the adhesion of the layers, but the toughness of the material itself.

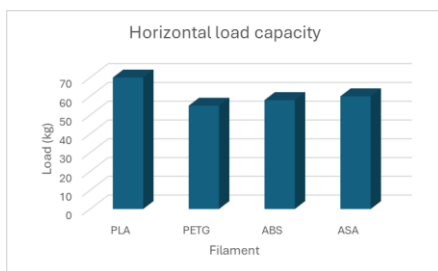


Figure 7. Thermal distortion diagram

Source: Own editing

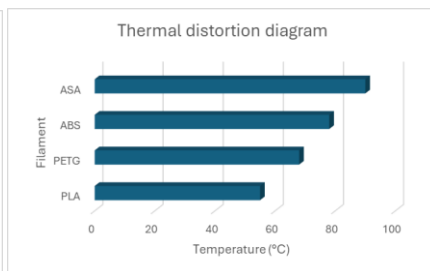


Figure 8. Horizontal load capacity diagram

Source: Own editing

Conclusions

Starting with the basics of FDM printing, I traced the development of 3D printing from its beginnings to the present day. In the next chapter, I continued with an examination of electronic components, detailing their operation and emphasizing their importance. Continuing this chapter, I discussed the embeddability of electronic components in 3D printed elements from all angles, crossing the two industries. In structuring this chapter, I naturally tried to cover the points that will form an important part of my project. When embedding electronic devices, I not only conducted research, but also carried out my own measurements so that I could examine the results I had measured myself. At the end of my research, I also conducted material research and comparisons, again using measurements, so that I could make decisions based on the most accurate data possible.

References

- [1] Embedded Sensors with 3D Printing Technology: Review. Sensors, Online, <https://www.mdpi.com/1424-8220/24/6/1955>
- [2] Powder bed fusion process in additive manufacturing: An overview, Online, <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214785320313900>
- [3] TE Connectivity: Types of Passive Components, Online, <https://www.te.com/en/products/passive-components.html>
- [4] 3D-printing and advanced manufacturing for electronics. Progress in Additive Manufacturing, Online, https://www.researchgate.net/publication/330855815_3D-printing_and_advanced_manufacturing_for_electronics
- [5] Cavdir Doga, Embedding Electronics in Additive Manufacturing for Digital Musical Instrument Design, Online, https://www.academia.edu/43527200/Embedding_Electronics_in_Additive_Manufacturing_for_Digital_Musical_Instrument_Design
- [6] A review on PLA with different fillers used as a filament in 3D printing, Online, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221478532106329X>
- [7] Sebészeti célokra alkalmazott 3D nyomtató anyagok mechanikai jellemzőinek vizsgálata és az eredmények alapján open access adatbázis létrehozása, Online, <https://ojs.emt.ro/oget/article/view/1943>

This work was supported by:

Egyetemi Kutatói Ösztöndíj Program [University Research Scholarship Programme (EKÖP)]
Kulturális és Innovációs Minisztérium (Ministry of Culture and Innovation),
Nemzeti Kutatási
Fejlesztési és Innovációs Alap (National Research, Development and Innovation Fund)

PROJECT NO. 2025-2.1.1-EKÖP-2025-00019-A-74 HAS BEEN IMPLEMENTED WITH THE SUPPORT PROVIDED BY THE MINISTRY OF CULTURE AND INNOVATION OF HUNGARY FROM THE NATIONAL RESEARCH, DEVELOPMENT AND INNOVATION FUND, FINANCED UNDER THE 2025-2.1.1-EKÖP UNIVERSITY RESEARCH SCHOLARSHIP PROGRAMME (EKÖP) FUNDING SCHEME



Implementation and Development of Mobile Networks

Márk Tamás Baross¹ and Márk Szegő²

¹Óbuda University, Doctoral School on Safety and Security Sciences, József körút 6. III., H-1088 Budapest, Hungary; baross.mark@uni-obuda.hu

²Óbuda University, Kando Kalman Faculty of Electrical Engineering, Budapest Bécsi st. 96/B, Budapest, Hungary; szego.mark@stud.uni-obuda.hu

Abstract: The development of mobile networks has been one of the most important technological processes of the past decades, fundamentally changing the way people communicate. From the simple radio telephone systems of the zero generation to today's state-of-the-art 5G networks offering high-speed data transmission, each new generation has brought new possibilities and services. Analog voice transmission has been replaced by digital communication, which has enabled better quality, greater capacity, and more secure operation, and the spread of mobile internet has triggered the development that has resulted in today's world of smart devices and networked devices. The central elements of the network's operation are base stations, which provide interconnection between wired and wireless networks. The development of base stations has closely followed the evolution of mobile generations, with earlier copper-based cabling solutions gradually being replaced by optical data transmission, which involves less attenuation and energy consumption. Modern 4G and 5G stations now operate with more efficient, compact devices that significantly improve network coverage and quality. Antennas are key components of base stations, ensuring signal transmission and reception. The operating principle, structure, and properties of antennas, such as gain, polarization, or directional characteristics, fundamentally determine the performance of the network. In this chapter of the publication, we present radio data transmission characteristics such as the phenomenon of fading, various modulation methods, and duplex technologies. The chapters covered so far provide a comprehensive overview of the development of mobile networks, describe the structure and operation of base stations, and present the most important characteristics of antennas and radio data transmission.

Keywords: Mobile network; 4G; 5G; Base stations; Antennas

6 Mobile network generations to today

Telephone networks are communication systems that enable voice and data communication between people and places that are far apart. This system is based

on wired and wireless technologies. In this chapter, we will present the generations of these mobile networks up to the most modern ones available today.

The development of mobile networks really took off after World War II, when the first commercially available radiotelephone systems appeared in 1945. The devices used for these were still a long way from today's mobile phones, but they represented a significant milestone in wireless voice transmission. This is why they are referred to as zero generation (0G), because due to their size and weight, the devices available at the time could only be used in buildings and in the trunks of vehicles, and were not really characterized by mobility. In vehicles, the transceiver unit was placed in the trunk, while the handset was placed in the passenger compartment. These 0G systems operated in a so-called Push-to-Talk mode, in which a button was pressed to switch between transmission and reception. They used an analog base station cellular network structure developed by Bell Labs engineers, in which the connection was interrupted when the cell was left. First-generation, or 1G, mobile networks appeared in the early 1970s and late 1980s, enabling truly mobile wireless voice communication. The analog radio communication system remained in place, but thanks to the seamless handover technology associated with Amos Bell, mobile devices were able to switch from one cell to another without losing connection and were able to automatically switch base stations. Real-time voice calls were now transmitted using analog FM modulation. An iconic moment of the era was when Martin Cooper, president of Motorola, made the first real mobile phone call in 1973 on a Motorola DynaTAC device, which weighed nearly 1 kg and was 23 cm tall. The early 1990s marked the beginning of a new era in mobile communications. Analog systems, on which 1G networks were also based, gradually faded into the background due to their low capacity and unreliability. Technological advances enabled the introduction of digital signal transmission, which was a huge step forward. Digital signals provided better sound quality, greater network capacity, and higher levels of data security. These innovations led to the emergence of second-generation (2G) mobile networks. The best known and most widespread standard is GSM (Global System for Mobile Communication), which was originally developed for European purposes but very quickly grew to global proportions. In Europe, it was launched primarily in the 900 MHz and 1800 MHz frequency bands, while in the United States, for example, it was launched in the 1900 MHz band. One of the best-known innovations in GSM network technology was the introduction of the SIM (Subscriber Identity Module) card. This is a small, replaceable chip card that is responsible for uniquely identifying the user. New multiplexing techniques have emerged to make communication more efficient. In Europe, the TDMA (Time Division Multiple Access) system was used, in which time slots were allocated to individual calls on a single frequency. In the United States, the CDMA (Code Division Multiple Access) system became widespread, in which individual users were separated on given frequencies by means of coding. The introduction of 2G networks not only improved voice transmission quality, but also enabled the introduction of new services. The best known of these was SMS (Short Message

Service), which enabled the sending and receiving of text messages. The next major milestone was the introduction of packet-switched data transmission systems, known as GPRS (General Packet Radio Service) or 2.5G. These mobile networks made it possible to maintain a continuous Internet connection. The GPRS system was followed by EDGE (Enhanced Data Rates for GSM Evolution), which further improved data transmission capabilities and enabled speeds of between 150 and 350 Kbit/s. Third-generation 3G mobile networks continued the trend that began with the development of 2G networks, as they aimed not only to further develop voice-based services, but also to make mobile data transmission even faster and more reliable. The 3G mobile network enabled the introduction of new multimedia services such as video telephony and video conferencing, which provided real-time visual communication with simultaneous image and sound transmission. Broadband mobile internet appeared, allowing users to watch online TV broadcasts and play online games. The UMTS network was also developed as its successor. With the HSDPA and later HSPA+ standards, it became possible to achieve ever greater bandwidth.

Furthermore, newer generations such as 4G and 5G already operate at the highest bandwidths available today, providing speeds comparable to those of average wired internet with minimal latency. [1], [2], [3], [4]

7 The Base stations

In this chapter, we will introduce the final key element in the structure of mobile networks: the base station. We will discuss base stations and their components and devices in more detail below.

There are base stations all over the world, where various service providers offer access to their networks. We can distinguish between several types of service providers depending on the purpose of the network. There are those, such as Magyar Telekom Nyrt. or Yettel Magyarország Zrt. in Hungary, which mainly provide mobile and data connections for the general public, but also provide unique, specific solutions for companies that meet their requirements. However, the state itself also provides mobile and data connection services to its own organizations, such as the ambulance service, the police, and the military. In the following, I will detail the operation and structure of base stations.

Base stations form a subsystem called the Base Station Subsystem (BSS). This system has several parts, including the base station (BS) or, in more modern networks, the Base Transceiver Station (BTS). These stations are connected by a base station controller (BSC). In more modern networks, such as 4G or 5G, there is no longer a BSC, but the base stations themselves communicate with each other in such a way that they are able to perform the tasks of the BSC, so these elements

are no longer necessary. Base stations form a subsystem called the Base Station Subsystem (BSS). This system has several parts, including the base station (BS) or, in more modern networks, the Base Transceiver Station (BTS). These stations are connected by a base station controller (BSC). In more modern networks, such as 4G or 5G, there is no longer a BSC, but the base stations themselves communicate with each other in such a way that they are able to perform the tasks of the BSC, so these elements are no longer necessary. A base station consists of several parts. The composition of these parts has changed over time as mobile network communications have evolved. I will discuss the components that make up base stations, including the structure of older base stations, because it is not only the current or most modern implementations that are in use around the world. There are countries where modernization processes are slower, so base stations used in 2G networks may still be common. Hungary is a good example of a country where modernization is happening more quickly. Over the past 20 years, there have been two nationwide modernizations of base stations as part of the transition to the new generation. It should be noted that the construction of base stations is closely linked to the construction of the current antenna system. This is a key factor that has influenced the current state of development of base stations in terms of construction. A typical tower base station can be thirty or even fifty meters high, depending on how high the point to be served is located in the area to be served, or what topographical factors need to be taken into account when serving the given area. This is an important factor because older base stations did not yet use optical data cables, which have negligible attenuation over the distances covered by tower heights, unlike copper-based cables. The antennas are located at the top of a station and are connected to a Remote Radio Unit (RRU), which is responsible for processing and transmitting signals that the antenna converts into radio frequency signals. In older base stations, the RRU was located at the base of the tower, together with all the other equipment. At the bottom of the base station, there is usually a container or a small, lightweight building that houses the main data connection components and their power supply.

At the bottom of the tower is the Baseband Unit (BBU), which receives data cables from a greater distance, formerly coaxial cables, but now optical cables. The BBU is responsible for processing the entire base station signal, which it transmits to the RRU. This device has a modular design that can be placed in rack cabinets. Since the BBU and RRU were located at the bottom of the old stations, the data cable coming from the RRU had to be routed up to the antennas. At that time, optical cables were not used here either, but thick copper cables, which had much higher attenuation. These cables were thick so that they could transmit data with as little attenuation as possible. In addition to these cables, the power cables for the antennas were also routed. This type of solution was more energy-intensive and also involved greater attenuation in terms of data transmission than today's optical cable implementations. The base station structure described above is an older design. Over time, RRUs have become smaller, allowing them to be placed closer to the antennas, thereby reducing the distance between the two and

attenuation. In even more modern implementations, copper-based data cables were replaced with fiber optic cables, which made it possible to avoid having to run copper data cables to the top of the tower, further reducing attenuation. The RRUs were still placed next to or below the antenna, but the data was now transmitted via thin optical cables from the BBU below, and in this solution, their name was changed to Remote Radio Head (RRH). This is how the structure of today's 4G and 5G base stations evolved, with only the BBU and power equipment located in the room at the bottom of the tower. Due to the use of optical cables and smaller, more energy-efficient equipment, the energy network requirements of the base station have been significantly reduced, and attenuation values have also decreased considerably. [7], [8], [9]

8 Mobile Network Radio Element of the Antenna

In the following, we will present the radio and wireless data transmission characteristics and structure of the base stations described in the previous chapter, which are an essential part of the theory required for radio design. An antenna is a device that converts electromagnetic energy fed into it into radiated electromagnetic waves and back again. This is important because an antenna can both transmit and receive radio signals at the same time. In addition, it is capable of modifying the distribution of the electromagnetic field, i.e., scattering. The simplest resonant structure of an antenna is the so-called half-wave dipole. The term dipole refers to two poles, from which we can conclude that its structure consists of two poles. This half-wave dipole radiator is broken at its geometric center, and the feed can be connected to the two poles thus created. the transmitter or receiver. An important feature is that its geometric length is equal to half the wavelength (λ) of its operating frequency ($\lambda/2$). There is a 90-degree phase shift between the current and voltage distribution in a half-wave radiator. Thus, the phase difference between the voltages at the ends of the radiator will be 180 degrees. The current is at its maximum at the center of the radiator, and the voltage is at its maximum at the ends. Furthermore, the impedance formed by the radiator can be determined at any point along its entire length based on the ratio of the voltage and current measured at that point. [10], [11]

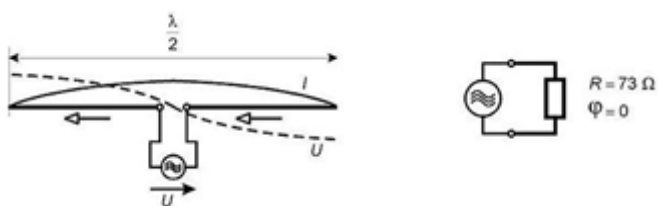


Figure 1. Center-fed half-wave dipole antenna

Source: <https://wiki.ham.hu/index.php?title=Dip%C3%B3l>

Antenna Characteristics: It is important to clarify the concept of antenna gain, which is one of the main characteristics of antennas. This requires the concept of an isotropic antenna, which is an antenna that exists only in theory and radiates energy evenly in all directions. Such an antenna cannot be built in reality, so it only serves as a basis for theoretical comparison. The latter concept can be used to define antenna gain, which expresses the power ratio in dB, showing how much power density a real antenna radiates in its main direction of radiation compared to an isotropic antenna fed with the same input power. The concept described above can also be expressed in the form of an equation

$$G = \frac{4 \cdot \pi \cdot A}{\lambda^2}$$

- G antenna gain
- A effective surface

The next important characteristic of antennas is their polarization, which determines the direction in which the electric field vector of electromagnetic waves propagates in space. In simpler terms, it determines the form and direction in which the signal emitted by the antenna propagates. This can be linear polarization, of which there are several types, such as horizontal or vertical polarization, but there is also what is known as cross or X polarization, in which the latter two implementations appear simultaneously, with the horizontal shifted by +45 degrees and the vertical shifted by -45 degrees from their original positions. The latter implementation allows two antenna systems to be implemented in one antenna, and such antennas are already found mainly in 4G and 5G systems. There are also so-called circularly polarized antennas, which have right- or left-handed rotation polarization. Another key feature is the antenna's beamwidth, which determines the angle range within which the peak power is reduced by half, the so-called -3 dB point. This angle is usually 60 degrees, because the -3dB point is generally located 30 degrees to the right and left of the main radiation direction. Nowadays, there are also antennas with beam widths of 65, 90, and 120 degrees, all of which have different characteristics depending on the intended purpose. This brings us to the concept of antenna directional characteristics, which is used in actual radio design. These characteristics are displayed in both 2D and 3D formats. Most antenna catalogs show the horizontal directional characteristics from a top view and the vertical directional characteristics from a side view in 2D format.

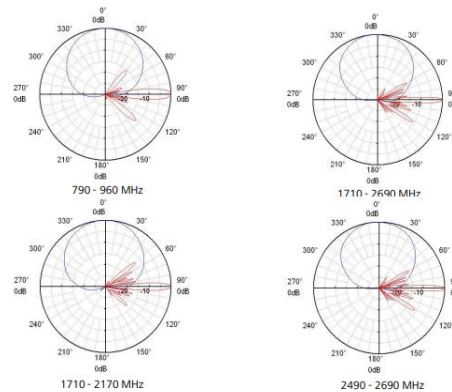


Figure 2. Directional characteristics from catalog

Source: https://www.bbr.ru/upload/iblock/407/8bbc895f_92a1_11e9_80da_0cc47a1243ef_4ba5654c_92a2_11e9_80da_0cc47a1243ef.pdf

The datasheet for an antenna contains all the parameters that the antenna has and can be used with. The figure above shows the directional characteristics of a Huawei AQU4518R0 antenna broken down by frequency range. The horizontal directional characteristics are shown in blue and the vertical directional characteristics in red. [10], [11], [12]

9 Radio Data Transmission Characteristics

An antenna's datasheet contains all the parameters that the antenna has and can be used with. The figure above shows the directional characteristics of a Huawei AQU4518R0 antenna broken down by frequency range. The horizontal directional characteristics are shown in blue and the vertical directional characteristics in red.

Antennas, as radio devices, are located in free space, which acts as a transmission medium. However, it is important to note that this free space may contain various vegetation, objects, or even living organisms that have a negative effect on the propagation of the emitted electromagnetic waves. Free space itself also has attenuation, which can be determined by a formula.

$$a_0^{dB} = 10 \log \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 = -32,4 \text{ dB} - 20 \log f^{MHz} - 20 \log R^{km}$$

- a_0 Outdoor attenuation
- λ frequency
- R distance

Outdoor attenuation depends on frequency and distance, and can also be influenced by weather conditions. As we increase the frequency of the transmitted

signal, attenuation will also increase, as will the distance. Therefore, systems operating at higher frequencies have a shorter range than those operating at lower frequencies.

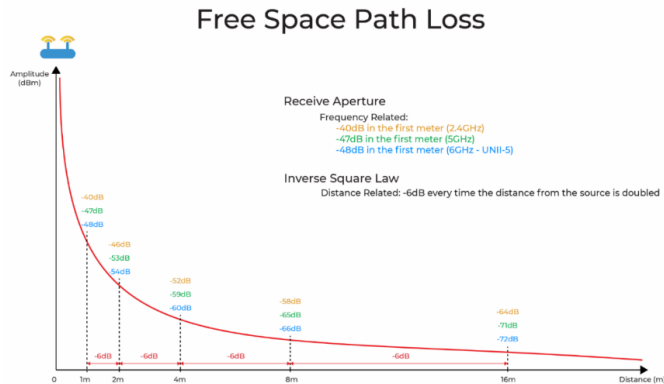


Figure 3. Outdoor attenuation

Source: <https://semfionetworks.com/blog/6ghz-free-space-path-loss/>

One of the most critical aspects of designing wireless communication systems is having a precise understanding of radio channel behavior. While free space path loss describes a deterministic power loss that decreases quadratically with distance, signal propagation in real-world environments is much more complex. Signals are reflected, scattered, and deflected by terrain features, resulting in random fluctuations in signal level at the receiver, known as fading. Fading phenomena can be divided into two main groups based on the speed of change and the nature of environmental effects: large-scale and small-scale fading.

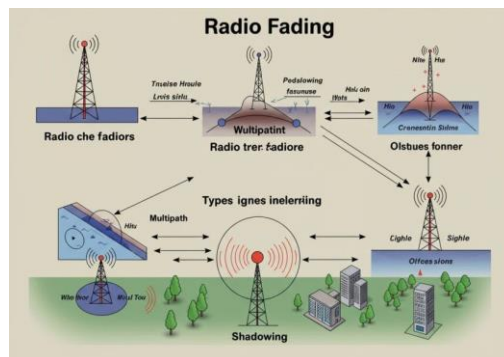


Figure 4. Fading types

Source: <https://elo.hu/fading-a-jelenseg-magyarazata-es-tipusai-a-radiotechnikaban/>

The most common type of large-scale fading is blanket fading, also known as the shadowing effect. This phenomenon occurs when large objects such as buildings,

mountains, or dense vegetation are in the path of the radio wave. The terrain features absorb or reflect a significant portion of the signal, causing the average reception power to fluctuate over long distances. Statistically, this distribution is often modeled using a log-normal distribution. Small-scale fading is caused by multipath propagation. The signal can reach the receiving antenna not only via direct line of sight (LOS), but also via numerous reflected paths. The phase and amplitude of these components vary randomly, creating constructive or destructive interference in the receiver. If there is no dominant direct component, the envelope of the received signal follows a Rayleigh distribution, hence the name Rayleigh fading.

Within Rayleigh fading, we distinguish further subgroups based on the relationship between the channel and signal parameters:

Fast vs. Slow fading: This classification compares the channel change rate (coherence time) with the symbol time of the signal.

Fast fading: The channel impulse response changes faster than the symbol duration, causing distortion within the symbol.

Slow fading: The channel state remains constant for several symbol durations.

Flat vs. Frequency selective fading: This classification examines the relationship between signal bandwidth and channel coherence bandwidth.

Flat fading: The signal bandwidth is smaller than the channel coherence bandwidth, so fading affects all frequency components of the signal equally.

Frequency-selective fading: The signal bandwidth is greater than the coherence bandwidth, so different parts of the spectrum suffer different degrees of attenuation, which can cause severe intersymbol interference (ISI). Parallel to the development of mobile communication generations, increasingly sophisticated methods have emerged to eliminate the effects of fading and increase spectral efficiency.

In second-generation (e.g., GSM) systems, equalizers (channel equalizers) were used to reduce distortions caused by frequency-selective fading and intersymbol interference (ISI). These circuits attempt to inversely restore the channel transfer function on the receiver side, thereby recovering the original signal shape. Third-generation (CDMA-based) systems treated multipath propagation not as an error, but as an opportunity to be exploited. The Rake receiver consists of several correlators, each of which processes a component of a delayed signal path. By summing these components in phase, the signal-to-noise ratio (SNR) can be significantly improved by exploiting multipath diversity. In 4G networks, which typically use OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) technology, the key to combating fading is accurate channel estimation. To do this, known pilot signals (reference signals) are transmitted, which the receiver uses to assess the current state of the channel. This is the basis for adaptive modulation and coding (AMC), which dynamically changes the transmission parameters (e.g., switching from QPSK to 64QAM) to match the channel quality, ensuring more robust transmission in poor fading conditions and faster transmission in good conditions.

Fifth-generation networks (5G NR) use the spatial dimension to overcome fading and increase capacity.

MIMO (Multiple Input Multiple Output): By using multiple transmitter and receiver antennas, multiple independent data streams can be transmitted on the same frequency, utilizing multipath propagation to increase bandwidth efficiency.

Beamforming: The antenna system focuses the radiated energy specifically in the direction of the user. This not only increases the range, but also drastically reduces interference and compensates for the significant outdoor attenuation that occurs at higher frequencies.

Az átviteli jellemzők tárgyalásakor elengedhetetlen a használt modulációs eljárások áttekintése, mivel ezek határozzák meg a spektrális hatékonyságot és a rendszer zavarűrését. A technológiai generációk váltásával egyre magasabb rendű modulációk váltak elérhetővé:

2G (GSM): Used only GMSK (Gaussian Minimum Shift Keying) modulation, which provided robust transmission with a constant envelope curve, but with limited data rates.

3G (UMTS): Techniques combining phase and amplitude modulation, such as QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) and 16QAM, appeared, enabling higher data transfer rates.

4G (LTE): The system is now able to switch adaptively between QPSK, 16QAM, and 64QAM depending on the current channel quality.

5G (NR): Scalability has been further increased with the introduction of 256QAM, which is combined with OFDM and SC-OFDM (Single Carrier OFDM) waveforms to achieve maximum capacity. [14], [15], [16]

In radio communication, it is essential to separate the uplink and downlink directions so that the signals in the two directions do not interfere with each other. Two main methods, as well as a combination of these, have become widespread for this purpose:

FDD (Frequency Division Duplexing): In frequency division duplexing, transmission and reception take place in two separate frequency ranges separated by a guard band. This enables continuous, simultaneous two-way communication. The disadvantage is that it always requires paired spectrum, which is a constraint in terms of frequency management. It is typically used in early mobile generations (e.g., GSM) and is dominant in LTE systems.

TDD (Time Division Duplexing): In time division duplexing, transmission and reception occur on the same frequency but in different time slots. This method is extremely flexible, as the ratio of uplink and downlink time slots can be set asymmetrically according to traffic demands (e.g., more time slots are allocated to the downlink direction when there is a greater demand for downloads). 5G networks, especially in the high frequency (mmWave) ranges, prefer TDD due to more efficient spectrum utilization and beamforming support.

Half-duplex FDD: In some special cases (e.g., cheaper IoT devices), the half-duplex FDD method is used, where although the frequencies are separated, the

terminal equipment is not capable of transmitting and receiving simultaneously. This simplifies the design of the radio unit (no duplexer required) but reduces the achievable transmission speed. [17]

Conclusions

The development of mobile communication networks has been one of the most dynamic technological processes of recent decades, fundamentally transforming social and economic interactions. This article reviewed the most important stages of this evolution, starting with the initial analog systems (0G, 1G), through the GSM (2G) and UMTS (3G) standards that brought about the digital revolution, to the modern 4G and 5G networks offering high bandwidth and low latency. It is clear that each generational change has brought not only an increase in speed, but also a structural paradigm shift. Looking at the physical implementation of the network, it can be seen that the architecture of base stations has undergone a significant transformation. Traditional, large-footprint, copper-based solutions have been replaced by compact, energy-efficient, fiber-connected RRU-BBU systems. This design not only reduces signal loss, but also allows for more flexible installation and operation, which is essential for serving densely populated urban environments. The analysis of the radio interface highlighted that overcoming the physical limitations of the wireless channel, in particular outdoor attenuation and fading phenomena resulting from multipath propagation, is the greatest challenge from an engineering perspective. Our article showed that while early systems (2G) used simpler equalization techniques, modern standards (4G, 5G) respond to these challenges with complex adaptive modulation techniques, orthogonal frequency division, and advanced antenna techniques. The development of duplexing techniques has also been key to the flexible and efficient use of the available frequency spectrum. Overall, it can be said that the development of mobile networks is a continuous optimization process in the triangle of coverage, capacity, and quality. From fine-tuning the directional characteristics of antennas to anti-fading coding, the technologies presented here all serve the purpose of making the uncertainties of the physical environment invisible to users, ensuring stable and fast connections in the digital ecosystem of the future.

References

- [1] *A Mobilhálózatok Fejlődése: 2G, 3G, 4G és 5G*, Online. Available: <https://www.bestfleet.hu/post/a-mobil%C3%A1%C3%B3zatok-fejl%C5%91d%C3%A9se-2g-3g-4g-%C3%A9s-5g>
- [2] *A mobilinternet története és felhasználása*, Online. Available: <https://www.smartos.hu/a-mobilinternet-tortenete-es-felhasznalasa-62?srsId=AfmBOoq5uircPbJnRZb0lwi7vHk4l2N2Ew0TU4S4Bg9fRCLBKEz8VuGv>
- [3] *Egy kis mobiltelefon történelem*, Online. Available: <https://www.sopronmedia.hu/cikkek/egy-kis-mobiltelefon-tortenelem>

- [4] *Mi az a sok G, avagy a mobilhálózatok története*, Online. Available: https://index.hu/tudomany/til/2020/10/30/5g_szaibarago_az_elso_negy_g/
- [5] *A mobil technológia műszaki háttere*, Online. Available: https://www.telekom.hu/statictr/sw/file/a_mobil_technologia_muszaki_hattere.pdf
- [6] *Mobilarena Tudástár – A GSM hálózatok működése (BSS, BTS, BSC)*, Online. Available: https://mobilarena.hu/teszt/a_gsm_halozatok_mukodese/bazisallomas_alrendszer_bss.html
- [7] *A bázisállomás alrendszer (BSS)*, Online. Available: <https://www.eirene.hu/?id=bss>
- [8] *Base Stations*, Online. Available: <https://www.geeksforgeeks.org/electronics-engineering/base-stations/>
- [9] *What Is A Base Station?*, Online. Available: <https://www.sannytelecom.com/what-is-a-base-station/>
- [10] HA5KFU (BME Rádióamatőr Klub): *Antennák – oktatási anyag*, Online. Available: <https://ha5kfu.hu/wp-content/uploads/2021/11/6b-Antennak-2021-osz.pdf>
- [11] Puskás Tivadar Távközlési Technikum: *Antennák és tápvonalak*, Online. Available: http://www.puskas.hu/r_tanfolyam/antennak_tapvonalak.pdf
- [12] Tutorialspoint: *Antenna Theory & Radiation Pattern*, Online. Available: https://www.tutorialspoint.com/antenna_theory/antenna_theory_radiation_pattern.htm
- [14] Helsinki University of Technology: *RAKE Receiver & Multipath Diversity*, Online. Available: http://www.comlab.hut.fi/opetus/333/2004_2005_slides/RAKE_text.pdf
- [15] Stanford University: *The Wireless Channel (Lecture Notes)*, Online. Available: https://web.stanford.edu/~dntse/Chapters_PDF/Fundamentals_Wireless_Communication_chapter2.pdf
- [16] *Comparison of QPSK and 16-QAM for OFDM System*, ResearchGate, Online. Available: https://www.researchgate.net/publication/340081645_Comparison_of_Traffic_Performance_of_QPSK_and_16QAM_Modulation_Techniques_for_OFDM_System
- [17] Qualcomm: *FDD vs TDD Spectrum*, Online. Available: <https://www.qualcomm.com/media/documents/files/fdd-tdt-comparison.pdf>

IoT (Internet of Things) awareness

Márk Tamás Baross¹ and Péter János Varga²

¹Óbuda University, Doctoral School on Safety and Security Sciences, József körút 6. III., H-1088 Budapest, Hungary; baross.mark@uni-obuda.hu

²Óbuda University, Kando Kalman Faculty of Electrical Engineering, Bécsi út 96/b, H-1034 Budapest, Hungary; varga.peter.janos@uni-obuda.hu

Abstract: The IoT, or Internet of Things, is a technological concept that allows various devices such as smartphones, household appliances, sensors, and vehicles to connect to the internet and to each other. These devices collect and transmit data and can even respond automatically to changes in their environment. The IoT is playing an increasingly important role in our everyday lives, whether in smart homes, smart cities, or healthcare monitoring systems. IoT awareness is extremely important for people to understand how these systems work and what benefits and risks they entail. This awareness is particularly important among younger generations, such as Generation Z, who are active users of digital technologies. Users' knowledge influences how safely and effectively they use these devices. Data security, personal data protection, and digital responsibility are becoming key issues in the world of IoT. In addition, technology raises social and ethical issues that should not be ignored. Raising awareness of the IoT can contribute to a safer and more transparent digital future. Therefore, appropriate education and information for all age groups is essential.

Keywords: IoT; Awareness; Generation Z; Data security; Digital technology

10 Introduction

The aim of our work is to explore the level of awareness related to the use of IoT (Internet of Things) devices, with a particular focus on the digital socialization of Generation Z. We want to highlight that a lack of technological knowledge can pose serious risks, especially in the areas of data security and user responsibility. In the course of our work, we will systematize the main areas of IoT awareness, such as data protection, usage habits, education, and environmental impacts, and based on these, we will seek training and communication approaches that can increase the technological maturity of users. As a result, we will strive to develop differentiated education and information transfer methods that promote the safe, sustainable, and conscious use of IoT devices, tailored to the characteristics of different generations and based on both domestic and international examples.

The IoT, or Internet of Things, is a technological concept that allows various devices such as smartphones, household appliances, sensors, and vehicles to connect to the internet and to each other. These devices collect and transmit data and can even respond automatically to changes in their environment. The IoT is playing an increasingly important role in our everyday lives, whether in smart homes, smart cities, or healthcare monitoring systems. IoT awareness is extremely important for people to understand how these systems work and what benefits and risks they entail. This awareness is particularly important among younger generations, such as Generation Z, who are active users of digital technologies. Users' knowledge influences how safely and effectively they use these devices. Data security, personal data protection, and digital responsibility are becoming key issues in the world of IoT. In addition, the technology raises social and ethical issues that should not be ignored. Raising awareness of the IoT can contribute to a safer and more transparent digital future. Therefore, proper education and information for all age groups is essential.

11 The importance of IoT awareness

The Internet of Things, abbreviated as IoT and IIoT, has become one of the defining terms of our time, but it is important to understand what it actually means. The IoT describes a network of physical devices equipped with sensors, software, and other technologies that connect to the Internet and can exchange data with other devices or systems. The IIoT, on the other hand, focuses on industrial sectors and applications such as machine-to-machine (M2M) communication, big data, and machine learning, enabling industries and businesses to achieve greater efficiency and reliability in their operations.

Based on this, it can be concluded that it can be of great help in our daily lives, but its improper use can pose at least as much of a risk. To reduce the risk, one of the main points is to develop and increase IoT awareness, because if we are aware of the potential risks, we can consider what would be the appropriate step in a given situation.

Awareness is a psychological concept that refers to the extent to which an individual consciously perceives and pays attention to their own and others' environments, and it includes the ability to recognize and understand the conditions and factors in their environment that may affect them. This is particularly relevant in the context of the IoT, which builds on our basic IT awareness and is complemented by the technologies and systems used.

IoT devices appear in many forms in our everyday lives, whether it be smartphones, smart TVs, smart watches, smart speakers, smart lighting systems, or home sensors such as temperature, motion, and air quality sensors. With the

proliferation of these devices, cybersecurity awareness is an extremely important issue for all age groups, which should be defined separately for each generation. [1]

12 Mapping age group classification and awareness

To develop awareness appropriately, generational groups must be considered. Within each generational group, we must consider technological developments and the areas and depth of awareness that need to be developed.

Age groups can be classified according to the following general classification based on date of birth, which was originally developed by William Strauss and Neil Howe, but was published by Zsolt Kulcsár in his 2008 e-book (revised in 2014) entitled Towards Integrative E-learning [2], [3], [4]:

- The largest generation
- The silent generation
- The baby boomer generation
- Generation X
- Generation Y
- Generation Z
- Generation Alpha
- Generation Beta

We need to determine a different starting point for each age group. This greatly influences the method used to develop awareness.

Generation Z is extremely important because its members were born into the digital world and are naturally adept at using the internet and smart devices. The online space is not only a source of information for them, but also their primary arena for socialization. This digital environment fundamentally shapes their media usage habits and information processing patterns. [4] Furthermore, they use IoT devices on a daily basis, but often unconsciously. Analyzing usage habits can help in the targeted development of educational materials. According to studies, members of Generation Z embody the "always online" characteristic in every respect, as they spend most of their lives in the digital space. [5] Members of this generation seek immediate answers, have a short-term time orientation, and are prone to multitasking. Their learning strategy focuses on navigation, as opposed to the fixed, brain-stored knowledge characteristic of previous generations. They

prefer theoretical knowledge transfer that has practical utility, as well as enjoyable and unstructured knowledge acquisition. [6]

Generation Z refers to people born between 1997 and 2010. Their age group can be considered the first generation of digital natives who grew up in a cloud-based, internet-connected world. For them, smart devices and constant online presence are natural and indispensable, so their IoT awareness shows a unique pattern. They are confident in using IoT devices but less interested in how the technology works or the details of data flow. Functionality and user experience are much more important to them than system architecture or network structure. They have lower data protection awareness. They often share personal data such as location, activity, and health data, often without being aware of the risks. There are also several other factors that will be discussed in detail later. [7]

Considering all the above, it is worthwhile for this generational group to develop their awareness of the IoT through differentiated educational materials appropriate to their level, whether in written form, video, or even audio podcasts.

13 Areas of awareness for Generation “Z”

IoT awareness among Generation Z can be examined from several angles, as this age group has been digitally socialized and, in many cases, has already come into contact with IoT devices such as smartphones, smart TVs, smart watches, smart home accessories, and sensors during their childhood. This chapter focuses mainly on Generation Z, but the same approaches may apply to other generations.

Six main directions can be identified, which are as follows:

- Data protection and security awareness

From a data protection and security awareness perspective, it is very important to be aware of the data collected by IoT devices, firstly what data is recorded, and secondly how personal the recorded data is. Also, do you know what data your smart device, whether it's a watch, phone, or tablet, sends to the device manufacturer, the app developer, or, as is often the case, both? Last but not least, do you understand the risks associated with devices equipped with cameras or voice control? In many cases, most of the generation does not read the privacy statements because it takes several seconds for the user to reach the accept button, where we accept everything almost instinctively without thinking, as it appears for every application and function. [8]

- Usage habits

When it comes to usage habits, it is important to consider what IoT devices are used in everyday life, such as smartwatches and smart home devices. The purpose

of each device may be to maintain health by counting steps, providing convenience features, or enabling the use of games or social media. Last but not least, it is important to consider the extent to which we want to automate our lives. If we think back to the past, when we wanted to buy any product, the only option was to physically go to the store, to the store, look for the product, consider whether we needed it, and buy it. Nowadays, we can immediately find the product in any online store with a description and video, and after we have made our decision, we can purchase it with a few clicks and start using it within a few days. [9]

- Education and awareness

From the perspective of education and awareness, it is important to consider the form in which education or knowledge about the IoT was received, whether at school, online, or through family. In our experience, neither school nor family provided sufficient knowledge, and there may be several reasons for this, such as a generation gap and uncertainty about using technology. Just think about how younger people perform any task on a smart device without thinking, while the older generation suddenly knows how to get started. The great advantage of Generation Z is the wide range of online content where they can find answers to their questions in a matter of seconds and do not even have to go to the library to find the right information. Furthermore, it is important that they are able to distinguish between a "traditional" device and an IoT device, and that they are familiar with basic IoT concepts such as sensors, data communication, and the cloud, because without a basic understanding, we simply use our devices without being aware of how they work. [8]

- Home environment

From a home environment perspective, it is important to know whether your family uses smart home IoT devices and systems, whether they are Zigbee, Matter, or systems from larger manufacturers such as Xiaomi, Apple, or Google, and how much they trust their operation and reliability. It is also important to know whether they are involved in setting them up and configuring them. If they are familiar with the configuration, they will be more aware, because a bad configuration can cause dangerous situations in the home environment, even in the case of a misconfigured Wi-Fi network. [10]

- Perception and attitudes

In terms of perception and attitudes, individual users have positive or negative experiences with the IoT, and these experiences greatly influence their trust in individual devices and systems. Consequently, what feelings does a world where "everything is connected to everything else" evoke in them, because in many cases it can be a major realization that in this environment, too much information is known about them. [9]

- Sustainability and environmental awareness

Finally, sustainability and environmental awareness: are they interested in sustainable IoT applications, such as energy-efficient smart devices like smart lamps or lighting systems? Knowledge of sustainability can lead to a positive attitude towards technology. Also, are they aware of the environmental footprint of IoT, given that a huge amount of e-waste is generated in the world today and this is a serious problem in consumer society? [10]

14 Training courses for Generation Z to raise awareness

From the perspective of domestic and international literature, there are numerous training courses available on the topic of awareness, but not specifically related to IoT, rather to learning about the associated technologies, systems, and tools, and expanding knowledge.

Literature research shows that IoT awareness in Hungary can be classified as low to medium. Most people use a variety of smart devices, but are not necessarily aware that these can be classified as IoT technologies. According to the National Media and Infocommunications Authority (NMHH), it is mainly the younger Generation Z that uses their devices more consciously.

From an enterprise perspective, and particularly in the industrial and logistics sectors, IoT-related solutions are increasingly being used, whether for inventory management tracking with scanners, RFID or NFC tags. It is particularly noteworthy that companies that use IoT more widely within the framework of Industry 4.0 have launched various pilot programs and projects to familiarize themselves with the devices and systems. One example is Bosc's Smart Factory project in Hatvan, where the main goal is the real-time collection and analysis of data from sensor-equipped machine lines. This can facilitate the introduction of predictive maintenance and thus reduce machine downtime.

From an international perspective, the populations of Western Europe and North America are much more aware of these devices and not only use them, but also understand how they work and the importance of data security. Among Generation Z, interest in the IoT is growing globally, mainly through smart homes, wearable health devices, and environmentally friendly solutions. This is because the convenience and positive effects of these devices are almost immediately apparent. In several countries, such as Estonia, Finland, and Germany, the basics of IoT are taught in primary and secondary education, and universities and colleges operate specialized IoT programs and laboratories. In terms of government strategies, the European Union's "Digital Europe Programme" and the US "IoT Cybersecurity Improvement Act" are noteworthy, as

they help raise awareness of IoT through various easy-to-understand professional materials and descriptions.[11], [12]

Finally, I prepared a tabular comparison of the most important aspects of IoT in Hungary and the three European countries presented above.

Focus	Hungary	Europe (Estonia, Finland, and Germany)
Public awareness	Low to medium level	Medium to high
Education	Appears infrequently	Integrated on multiple levels
Enterprise application	Mainly in industry	Wide range of applications
Government support	Industry 4.0, NKFIH tenders	Strategic programs, laws
The role of Generation Z	Growing interest	Growing interest, main target group, active users

1. Table: Key considerations for IoT

15 Opportunities for developing awareness among Generation Z

The opportunities for developing awareness among different age groups, but mainly among those born in Generation Z, are presented below. The main goal is to take advantage of the benefits of technology while using IoT devices and systems consciously and safely.

- Z generation

The most conscious users, but often those who prioritize convenience.

Main recommendations:

- **Increasing data awareness**

Warning about the dangers of "invisible data flow." When and how user devices collect various data, sounds, and images. Also, the issue of permissions, so that we consciously accept access requests.

Encouraging regular checks of privacy settings. In many cases, changes may occur, modifying our previously accepted privacy settings, which may no longer be appropriate for us.

The principle of data minimization: only share necessary data, thereby developing conscious data management. [13]

- **Education and access to information**

Support for university courses and workshops on digital awareness and ethical use of technology. Experienced educators and industry professionals can provide insight into these areas, thereby raising awareness. Podcasts and YouTube series about the dangers and benefits of IoT in an easily accessible, short, youthful format. Since this generation's consumption of information content has accelerated to such an extent that only concise content lasting 1-1.5 minutes can adequately convey content and information in a rich and interesting way. [14]

- **Awareness of tool selection**

Data protection should be a consideration in purchasing decisions, such as when it is advisable to use local data storage or cloud-based technology. Software update frequency, as manufacturers almost always perform bug fixes to protect the security of our data, but of course, improvements are also made in other areas. Last but not least, manufacturer reliability: a larger manufacturer that has been present on the market for several years can provide a clear picture of itself and its individual devices. [15]

- **Community thinking**

Peer-to-peer knowledge sharing Young people share information with each other in their own language. This can be done on various popular platforms such as TikTok, YouTube Shorts, Instagram, or any similar interface. Organizing IoT challenges and campaigns at the university community level. For example, "A week without IoT" or "Is it possible to live without IoT today?" Similar titles can easily draw attention to self-education and awareness development.[16]

Overall, don't just use the tool and system, but understand it too, because technological knowledge needs to be accompanied by reflective, critical thinking and an understanding of digital ethics and data awareness. We believe that all of these together can ensure IoT awareness. However, it is important to keep the individual teaching materials up to date, because a new device or system may come along at any time that could affect other areas.

Conclusions

IoT awareness means that people know and understand how the Internet of Things works, its possibilities and risks. [17] IoT devices such as smart watches, thermostats and security cameras are becoming increasingly common in everyday life. Their conscious use is key to protecting privacy and data security. Users are often unaware that these devices are constantly collecting data. The proper functioning of IoT systems requires not only technical background, but also user knowledge. Low awareness increases the risk of abuse and cyberattacks. Younger generations, especially Generation Z, come into contact with these devices at an early age, but do not necessarily understand how they work. Developing awareness contributes to responsible digital behaviour. [18] Education, information, and user guides can help in this process. Our work presents a general recommendation that can be applied in various areas. [19] Overall, IoT awareness is key to a secure and efficient technological future. As the everyday use of IoT devices becomes more widespread, it is becoming increasingly important to raise user awareness, especially among Generation Z. Research shows that although this age group is confident in using technology, they often lack basic knowledge about data protection and security. Education and information must play a central role in ensuring that the use of digital devices is not only convenient but also responsible. Raising awareness can contribute to protecting privacy, reducing cyber risks, and creating a safer and more transparent digital environment. Overall, it is essential that the development of IoT technology is accompanied by the development of a culture of information security among users. The stability of tomorrow's digital society depends largely on how well users understand the workings and risks of the technologies that surround them. Awareness of IoT devices is not just a technical issue, but also a social and ethical responsibility. It is particularly important to develop generation-specific educational materials and information campaigns that take into account the characteristics of different age groups. Raising awareness of device selection criteria such as security features, updatability, and data management helps users make informed decisions. All of this promotes the responsible, sustainable, and secure integration of smart devices into society.

References

- [1] Zs. Kulcsár: Az integratív e-learning felé, Online, Available: <https://mek.oszk.hu/06600/06695/>
- [2] A. Okros: Generational Theory and Cohort Analysis. In: Harnessing the Potential of Digital Post-Millennials in the Future Workplace. Management for Professionals, Springer, Cham, 2020, Online, Available: https://doi.org/10.1007/978-3-030-25726-2_2
- [3] V. W. Marshall: Generations, Age Groups and Cohorts: Conceptual Distinctions, Canadian Journal on Aging, 2(2), pp. 51–62, 1983, doi:10.1017/S0714980800015701
- [4] Á. Nagy, A. Fazekas: Offline helyett online szabadidő? Médiakutató, vol. 17, no. 2, pp. 41–57, 2016, ISSN 1586-8389
- [5] Á. Csiszárik-Kocsir: A különböző generációk digitális jelenlétének háttérmotívumai, Online, Available: https://kgk.uni-obuda.hu/wp-content/uploads/2024/06/VF_TK_24_1_A-kulonbozo-generaciok-digitalis-jelenletenek.pdf
- [6] É. Bíró: Gondolatébresztő a Z generáció oktatásához, Online, Available: <https://www.ludovika.hu/blogok/kreativitas-blog/2024/04/18/gondolatabreszto-a-z-generacio-oktatasahoz/>
- [7] T. Francis, F. Hoefel: ‘True Gen’: Generation Z and its implications for companies, Online, Available: <https://www.mckinsey.com/industries/consumer-packaged-goods/our-insights/true-gen-generation-z-and-its-implications-for-companies>
- [8] rinf.tech: Privacy Concerns and Data Protection in IoT, Online, Available: <https://www.rinf.tech/privacy-concerns-and-data-protection-in-iot/>
- [9] M. Ghunaim: Investigating the Impact of User Behavior in the Security of Smart Home IoT Devices (Dissertation), Online, Available: <https://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:ltu:diva-98559>
- [10] S. H. Alsamhi, O. Ma, M. S. Ansari, Q. Meng: Greening Internet of Things for Smart Everything with a Green-Environment Life: A Survey and Future Prospects, arXiv preprint, arXiv:1805.00844, 2018

- [11] KBV Research: Global IoT in Education Market Size, Share & Trends Analysis Report 2024–2031, Online, Available: <https://www.kbvresearch.com/iot-in-education-market/>
- [12] The Guardian: Estonia eschews phone bans in schools and takes leap into AI, Online, Available: <https://www.theguardian.com/education/2025/may/26/estonia-phone-bans-in-schools-ai-artificial-intelligence>
- [13] B. Al Muhander, N. Arachchilage, Y. Majib, M. Alosaimi, O. Rana, C. Perera: PrivacyCube: Data Physicalization for Enhancing Privacy Awareness in IoT, ACM Transactions on Internet of Things, vol. 6, no. 2, pp. 1–35, 2025
- [14] Keepnet Labs: Navigating the IoT Frontier: Security Awareness Training for a Connected World, Online, Available: <https://keepnetlabs.com/blog/navigating-the-iot-frontier-security-awareness-training-for-a-connected-world>
- [15] WIRED: IoT Security Is a Mess. Privacy 'Nutrition' Labels Could Help, Online, Available: <https://www.wired.com/story/iot-security-privacy-labels/>
- [16] M. Balestrini, T. Diez, P. Marshall, A. Gluhak, Y. Rogers: IoT Community Technologies: Leaving Users to Their Own Devices or Orchestration of Engagement?, EAI Endorsed Transactions on Internet of Things, vol. 1, no. 1, 2015
- [17] IVSZ: Az Internet of Things koordinált fejlesztése és alkalmazásának elterjesztése Magyarországon, Online, Available: <https://ivsz.hu/wp-content/uploads/2016/04/az-internet-of-things-koordinalt-fejlesztese-es-alkalmazasanak-elterjesztese-magyarorszagon-.pdf>
- [18] G. Törley: Informatikai biztonságtudatosság, Online, Available: http://tehetseg.inf.elte.hu/jegyzetek/infobizt_tananyag_efop2019.pdf
- [19] V. Patrik, G. F. Mónika: Az IOTS-eszközök átfogó elemzése, Online, Available: https://kgk.uni-obuda.hu/wp-content/uploads/2024/06/VF_TK_24_1_Az-IOTS-eszkozok-atfogo-elemzese.pdf

Modernizing the FASTBUS readout system of the CERN NA49/NA61 experiment ToF detector using Raspberry Pi

Gábor Csaba Lucza, [email: luczgab03@gmail.com](mailto:luczgab03@gmail.com) ¹

Tibor Benke, [email: benketib@student.elte.hu](mailto:benketib@student.elte.hu) ²

Dominik Márk Lévai, [email: levoidominik@student.elte.hu](mailto:levoidominik@student.elte.hu) ²

Márk Tamás Baross, [email: baross.mark@kvk.uni-obuda.hu](mailto:baross.mark@kvk.uni-obuda.hu) ¹

¹Kandó Kálmán Faculty of Electrical Engineering, Óbuda University, Hungary, 1034 Budapest, Bécsi út 96/B

²Institute of Physics and Astronomy, Eötvös Loránd University, Hungary, 1117 Budapest, Pázmány Péter sétány 1/A

Abstract: The FASTBUS [1] crate is a powerful modular data transfer system which uses ECL (Emitter Coupled Logic) electrical standards to achieve fast parallel communications with a 32 bits wide data line. Although FASTBUS crates were largely replaced by modern serial solutions [2][3], they are still in widespread use in legacy systems such as in older particle detectors. In this study we present a modernized FASTBUS readout system designed in collaboration with the Institute of Physics and Astronomy at Eötvös Loránd University for use with the ToF (time of flight) detector[4] formerly used in the CERN NA49/NA61 experiments and now being recommissioned for educational and research purposes. Our goal was to design a low-cost system capable of reading out up to 744 data channels used in the detector. For these purposes we have decided to use a Raspberry Pi 3B microcomputer connected to the FASTBUS crate via a custom control card. The control card translates between ECL and TTL signals and extends the number of general purpose I/Os of the Raspberry Pi, so it can use almost all FASTBUS operations.

Keywords: FASTBUS, readout system.

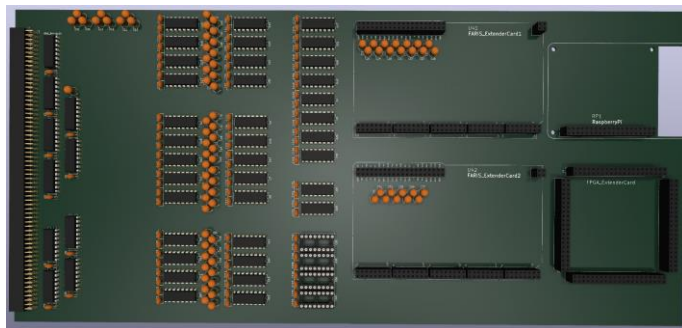


Figure 1: The main board of the FASTBUS control card. There are pins to potentially replace the Raspberry with an FPGA in the future.

1 Introduction

In 2020 ELTE acquired two older particle detector walls previously used in CERN's NA49/NA61 experiments, which were previously scheduled for disposal. The detector walls also known as "Buda Walls" were built around 1996 by KFKI in collaboration with ATOMKI. The walls were used in a ToF (time of flight) setup to identify the particles created in the experiments.

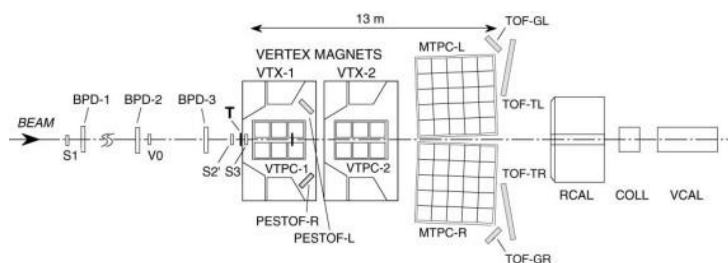


Figure 2: The set-up of the NA49 experiment. The Buda walls are TOF-GL and TOF-GR in the picture.

The walls in total have 372 analog channels where the particles flying through create electrical pulses. We can measure when these pulses are created with an estimated time resolution of 85 ps, and we can also measure their amplitude which can be used to calculate the energy of the particles. For these measurements we use LeCroy 1885F ADC and 1875A TDC FASTBUS cards. The need to use these

instruments in a modern way, and the lack of viable commercially available solutions are the main motivation of creating this new readout system.

1.1 The legacy system

The legacy readout system used a FASTBUS-VME bridge. On the FASTBUS side there was an F68B7 FASTBUS master and an FADAP cable segment connector which was used to connect more crates together and to connect the crates to an CES LDA9212 on the VME side controlled by a VME/VSBI controller. The controller used the FVSBI interface to communicate with the FASTBUS master, sending it commands to execute and receive data back from it. Then a VME to USB bridge was used to communicate with the outside world.

1.2 The goals of our new system

Our goal was to eliminate this dependence on a VME/VSBI environment (or any other "glue bus" systems for that matter), and to make using FASTBUS more straightforward, manageable and more easily integrable to new systems. For that reason we propose a novel approach of reading out FASTBUS instruments directly. This new DAQ (data acquisition) system which consists of a FASTBUS master card which houses the needed electronics to translate between the ECL logic levels used in the bus and the internal TTL/CMOS logic levels of the master. Furthermore this master card has a microcomputer with an I/O extender or an FPGA to run the DAQ program and to emulate the FASTBUS functions, managing the bus real time and storing data for future analyses. This can be easily accessed through a network by an external computer where the data can be stored analyzed.

2 FASTBUS

Historically, FASTBUS was created in response to the limitation of CAMAC (Computer Automated Measurement and Control)\cite{CAMAC}, using large 32 bit data lines, and ECL logic to speed up the bus itself. It also standardized multicrate and MASTER-MASTER communications. But with the rise of high speed serial protocols and developments in CMOS technologies a large, power hungry parallel bus wasn't feasible anymore. So it was superseded by serial bus solutions like VME and its later versions. FASTBUS at its core is a MASTER-SLAVE system. At any given time in a crate segment there can only be one MASTER and it has control over the whole segment. If there are multiple MASTERS they take turns in controlling the bus, with strict conditions not to halt the bus. For our use case we will only use one master per crate segment to

eliminate unwanted complexity. A normal readout cycle is initiated by the MASTER and it grants bus access to the SLAVES one at the time, reading out their content. The means of communications are laid out in the IEEE 960-1986 (FASTBUS) standard, and in the data sheets of the given SLAVE.

A FASTBUS crate has a backplane with connectors for the inserted cards. This PCB (printed circuit board) is what enables the communication and also connects to the power supply. The backplane is what the standard calls a crate segment. Furthermore a crate also has an ancillary logic unit that has hardwired bus access and manages the MASTER-MASTER communications, addressing, and the Run/Halt logic. In addition, the crate has a side bus called "Auxiliary". This segment is isolated from the main bus, providing user or manufacturer defined purposes. Our MASTER will not use this option. The precise electrical workings of the backplane and the functions of the logic unit are also outlined in the FASTBUS IEEE standard.

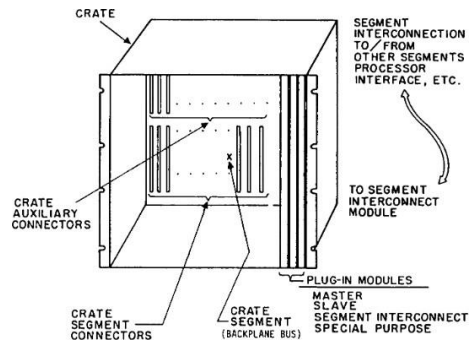


Figure 3: The structure of a FASTBUS crate, its backplane.

2.1 Topology

The FASTBUS standard calls for at least one MASTER per crate segment, but these MASTERS can't communicate with the outside world directly. For that the segment interconnects (SI) can be used to connect the bus to a processor interface (PI) which in turn can be connected to any desired system that has host processors. In the legacy systems PI was the FVSBI hardware and the host processor was in the VME environment. Our new readout system strictly speaking violates the FASTBUS standard in the regard that it integrates the PI and the host processor into the crate MASTER, simultaneously giving this "new MASTER" module communication, storage, and computing capabilities. This approach has the drawback of eliminating the multi-MASTER and multicrate capabilities of FASTBUS. But these use-cases aren't very common, moreover even a Raspberry

PI 3 compute module (which we are using) has more than enough computing capacity to handle any task that required a multi-MASTER setup. And for multicrate operations our new MASTER solution can feasibly be installed in every crate separately due to its low cost. We believe this solution greatly reduces complexity and eliminates potential error sources.

3 System Design

The new MASTER module will have 3 parts: The computer, the general purpose IO which the computer can control, and the ECL-TTL and TTL-ECL converters to translate between the BUS signals and the GPIOs of the computer.

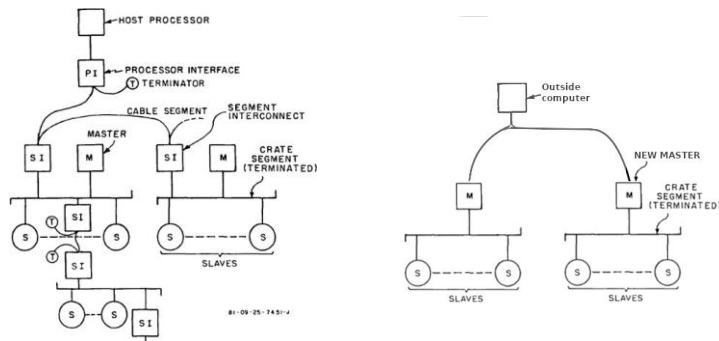


Figure 4: The original and modified topology

3.1 Raspberry Pi

We chose the Raspberry Pi platform for the main computer in the MASTER module (to be precise the PI 3B+, but the system will work with any newer and more powerful PI compute modules as well). The main motives behind this choice are price, availability and - most importantly - ease of use. The PI platform is very well documented and has its own minimalist Linux system which makes development and system integration fast and easy.

The PI 3B+ has a 64bit ARM Cortex-A53 CPU running at 1.4 Ghz, with integrated USB ISP I2C and UART controllers. It has no problem emulating any and all FASTBUS protocols that were originally running on the Motorola CPUs.



Figure 5: The Raspberry PI 3B+ compute module.[6]

The only problem with this is that the integrated GPIO controller of the PI doesn't provide enough IO for our needs. But this problem can easily be remedied by using one of the serial communication ports of the Raspberry to connect it to external IO controllers. In our system we will use I2C because of the large number of IO controller ICs. In the current hardware revision at the time of writing this I2C bus is the main bottleneck of the system; this bus is only 400 KHz, for our use case it will not cause any serious dead time but in the future with new hardware revisions we will explore potential solutions to greatly speed up this internal communication.

3.2 The IO expander

The main PCB of our master is a modular design, so if any of the problems mentioned above become too great these modules can be swapped out. The IO expander modules of this revision consist of five MCP23017 ICs.

3.2.1 MCP23017

The MCP23017 [7] is a register based I/O extender. It has 16 pins that can be configured either inputs or outputs, which is implemented by serial data transmission. I2C is a two-wire serial communication protocol that uses bidirectional SDA (data) and SCL (clock) lines to enable data transmission between two or more external peripheral devices and the microcomputer. The speed of the I2C line can be configured in the software, allowing it to be adjusted to the needs of the system. In our solution, we will use the "Fast-Mode" which performs at a 400kbit/s rate, but this device also supports 1.7Mbit/s speed. The SDA and SCL are defined to be high in idle state, changing it initializes the communication process. The process begins with a particular START condition, in which case the SDA is pulled low, but the SCL remains high. Next, the SCL will begin clock generation, and SDA will change always when SCL is low, except START and STOP conditions. According to the standard, after each byte

is sent, the peripheral device pulls the "9th bit" low, which is the ACK (Acknowledged) bit. This will confirm the data transfer success.

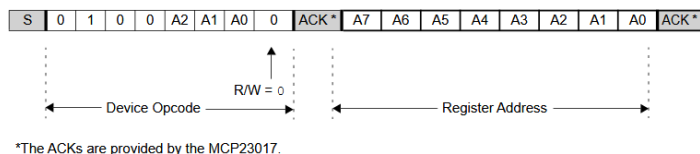


Figure 6: MCP23017 addressing by I2C protocol

In this case, the first 4 bits are predefined by the IC, so they can't be changed. The next 3 bits are defined addressing bits, that determine which integrated circuits we are talking to. The last bit is a R/W (read/write) bit, which can be configured in the software. After these 8 bits are recognized, the SLAVE pulls down the ACK bit to acknowledge the address, indicating other devices not to listen to the data-line. The next byte will be the data sent by the controller or the MCP23017. Data transmission continues until a STOP condition appears, indicating the end of communication. The device includes two built-in 8-bit registers (PORTA and PORTB) whose input or output configuration can be set using IODIRA/B registers. In addition, 11 register pairs provide functions and settings required for the device's operation, and navigation between them can be done in two modes. These are "Byte mode", which disables the default incrementation of the "Address Pointer" and "Sequential mode", which enables it. In our software design, we will use the special byte mode, which enables us to step between particular register pairs (for example GPIOA and GPIOB). Because of this setting, our addressing does not waste unnecessary resources, allowing the system speed to be optimized. Based on the speed of the Raspberry Pi's I2C output and the number of bits sent, we can calculate the maximum speed of the parallel signals appearing on the bus. In our case, we will use the "special byte mode" so that we do not need to send the target register address with each bit sequence. Thus, the total number of transmitted bits will consist only of the slave addressing and the data sequence.

$$\begin{aligned} \text{Number of bits} &= \text{address byte} + \text{register A byte} + \text{register B byte} = 9 + 9 \\ &+ 9 \approx 30 \end{aligned}$$

(with ACK)

$$f_{\text{bus}} = \frac{f_{\text{RP}}}{\text{number of bits}} = \frac{400 \text{ kHz}}{\approx 30} = 13.33 \text{ kHz}$$

This means that the IC will increase the number of I/Os, but at the cost of reducing the maximum speed of the bus to 13.33 kHz. The output frequency of the I/O is sufficient translation between ECL and TTL.

The FASTBUS operates on ECL levels while the controller uses TTL logic. Due the significant difference between the two standards, direct connection is not possible, so level shifters need to be inserted between the two circuits.

3.2.2 Emitter Coupled Logic

ECL [8] was considered the fastest logic of its time, used in applications that required short switching times. This logic system is based on a differential transistor pair. One of the transistors always lets through current, which is why this logic family is often referred to as the current-steered logic family. The speed of the switching is due the fact that the transistors do not enter the saturation territory, instead operating in the active region. As a result, the voltage difference between collector-emitter is low, so the parasitic capacitance will discharge faster due the lower charge voltage. This means that the switching time between high and low is a few nanoseconds, but because of the current-steering, it has a large power consumption. With the development of the CMOS standard, ECL lost much of its popularity, as similar speeds became achievable without the disadvantage of high power consumption.

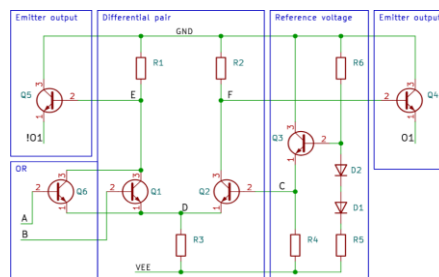


Figure 7: ECL OR/NOR gate

The ECL family also includes special types developed in later generations. The classic type, MECL (Motorola ECL), used 0 V and -5.2 V as supply voltages for negative logic outputs. Later, a TTL-compatible variant called PECL (Positive ECL) was introduced, which used a 5 V supply and had positive logic output levels. Furthermore, the positive family also included a lower-voltage version called LVPECL (Low Voltage Positive ECL) for outputs at reduced positive voltages.

3.2.3 Transistor-transistor logic

TTL [9] (Transistor-Transistor Logic) is a logic family built on bipolar transistors, which implements both logical operations and output driving using transistors. The technology is an improved version of DTL (Diode-Transistor Logic), and due to its simplicity and speed, it quickly became popular in industry and among hobbyists. During circuit operation, the logic levels are typically represented by discrete values of 0 V (low) and 5 V (high). Its switching time is on the order of tens of nanoseconds, which is moderately fast among logic families. But in many applications, this timing is entirely adequate. The switching speed is largely determined by the “totem pole” configuration used for output driving.

The TTL logic family has several improved variants, each targeting the enhancement of a specific property. These types differ from each other in terms of speed, power consumption, and noise immunity, and thus each optimized for particular application area. For example low-power TTL (TTL-L) has a few milliwatts of consumption, but this result in the decreased switching speed. Also notable is the Schottky TTL family, whose use of Schottky transistors allows switching speeds (as low as 3 ns) comparable to those of ECL. Additionally, we can mention the classic form of TTL logic, Standard TTL, which uses NAND gates to construct logical functions.

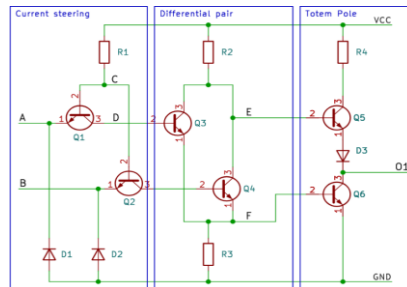


Figure 8: TTL NOR gate

3.2.4 10124

This type of integrated circuit [10] is a 4 channel device capable of unidirectional translation between TTL and ECL logic families, with negligible propagation delay. Since it consists of ECL, the power consumption of these ICs is high, which will be important in the design of the power rail. It is important to note that this device does not have a tri-state mode.

This particular device was selected because the existing FASTBUS cards already use the same type, thereby eliminating the risk of compatibility issues. Additionally, the decision was influenced by commercial availability of this type and the ease of its practical implementation.

3.2.5 10125

The 10125 [11] is the counterpart to the 10124, meaning this device is capable of translating ECL differential signals into TTL logic levels. Since it consists of ECL logic it has a high current consumption, therefore it has a high power dissipation. Similarly to the 10124, it does not have a third, high impedance state and thus the output is either high or low.

To ensure reliable operation both inputs need to be connected properly. In a single wire application the VBB reference (typically -1.3V) voltage should be properly connected to the unused input leg. For power supply the MECL logic requires -5.2V and 5V with a GND. These voltages are available from the FASTBUS backplane.

4 New architecture

Since the planned module would form a large unit that would complicate future upgrades, the system therefore consists of two separate modules. The first part is the main board, which contains the mentioned translators, the second is the I/O extension module. This modular approach ensures that if the Raspberry Pi provides insufficient performance, the system can be upgraded or replaced without any obstacles.

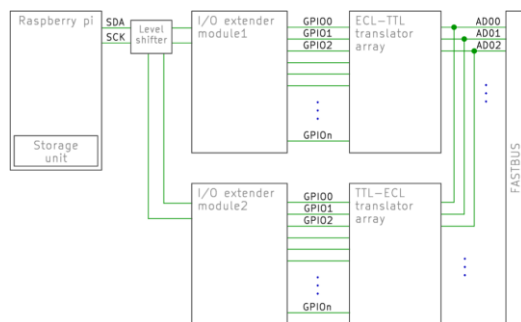


Figure 9: Logic diagram of the new system

The required number of expanders can be determined from the number of data and control lines to be managed. The FASTBUS has 42 control lines and 32 data lines, meaning a total of 74 lines are required for full bus control. Since the expanders ICs have 16 channels each, 5 units would suffice in an ideal case. However, because of the translators' two-state property, outputs can't be connected together, meaning that 10 unit will be needed for reliability. This quantity also includes spare, currently unused outputs reserved for future expansion. Since the level translator supports only unidirectional communication, one group of the expanders will function as inputs and the others as outputs. With this connection scheme, once the system is assembled

the modules will be fully capable of bidirectional communication between FASTBUS and Raspberry Pi.

4.1 I/O extender modules

A key design consideration was the TTL side drive of the level translators which require 0V and 5V levels. The MC23017 is capable of operating with 5V drive; however, the main problem came from the Raspberry Pi, whose SDA and SCL high level outputs are only 3.3V. Therefore a simple bidirectional FET level shifter was inserted between the I/O extender and the Raspberry Pi. The IRLZ44N MOSFET was selected primarily because it was already available in stock, and secondarily because of its fast switching speed. Since the number of required devices does not reach the maximum addressable limit of 10, the RESET pin was utilized. This trick effectively allows the use of multiple devices with identical hardware addresses on the same bus, thereby increasing the total number of usable extenders beyond its normal limit.

Due to the current draw of the ICs during switching, the supply rails can experience voltage drops, which is a problem for signal integrity. To prevent this, decoupling capacitors are placed close to each IC. Thanks to their charge-storage capability, these capacitors suppress switching transients. For stable operation, a combination of 100nF and 1uF ceramic capacitors is used in parallel at each chip.

4.2 The main PCB

The main PCB has the crucial job to connect to house the compute and IO expander modules, further more this is where the ECL-TTL and TTL-ECL converts are also placed, and of course this is where the FASTBUS connector is mounted.

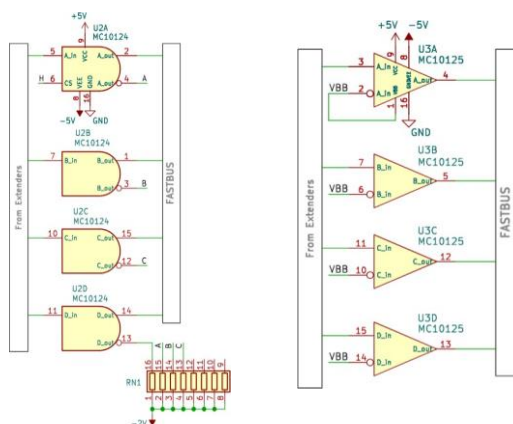


Figure 11: Main PCB schematic

To enable the MC10124, its CS (Common Strobe) is permanently tied to TTL high level. Its non-inverted (true) outputs are directly connected to the corresponding FASTBUS pin, which are internally terminated on the backplane. The unused ECL outputs must be terminated according to the datasheet, which is accomplished through a DIP-16 100 Ω resistor network. The inputs of the MC10125 are directly connected to the FASTBUS pin, although the two IC types share the same bus line and are therefore not physically isolated. Muting the I/O expander boards prevents them from driving the translators, so they cannot interfere with unidirectional data flow. A reference voltage is also provided at the 10125, this voltage appears on V_{BB} pin as soon as power is applied.

The Raspberry Pi connection is made via a 2x20 pin header. All signals to the expander boards are routed through this header. The Pi and the entire system supplied by the FASTBUS power rail. The schematic also includes a custom FPGA socket which can be used for future extensions or upgrades.

5 Future plans

In the future, we intend to design and manufacture the hardware - that is, the PCB -, and also implement the required signal chain in a software environment. We would like to assess the limit values of the structure we create, and based on this, perform optimization of the system. We have also considered using an FPGA (Field Programmable Gate Array) instead of the I/O expanders that determine the speed limitations, since it is compatible with our existing Raspberry-based controller. Within the unit built this way, we aim to establish MASTER-MASTER communication, where the Raspberry issues commands to the FPGA, and the FPGA reads and stores the data.

6 Summary

In the above study we have designed a Raspberry-based FASTBUS readout system, to be used with a reactivated particle detector at ELTE. System control is performed by a Raspberry Pi 3B+, whose computational performance is more than sufficient. However, the Pi uses 3.3V TTL logic levels and therefore cannot directly interface with FASTBUS ECL signals. To solve this incompatibility, a level shifter and dedicated unidirectional level translators are used. Since full FASTBUS operation required control of 74 signals (32 data + 42 control lines) and the Raspberry Pi has far fewer GPIOs available, I/O expanders were used. Each MCP23017 extender provides two 8-bit registers (16 I/O lines in total), and are controlled via I2C serial bus. The main drawback of this approach is the serialization of a naturally parallel bus, which reduces the overall speed of the bus. Therefore special configurations are used for speed optimization.

The I/Os of the MCP23017 expanders are directly connected to the inputs of the translators, thereby establishing reliable bidirectional communication between the modern compute module and the legacy FASTBUS.

Special thanks

Our work was supported by the Department of Atomic Physics at ELTE who kindly let us use one of their laboratories for our research. The Buda Wall and its related components were made by our dear colleagues at KFKI and were donated to ELTE by the CERN collaboration. We give special thanks to Dr. Gábor Veres (ELTE) who is the project manager of the Buda Wall reactivation efforts, and also to Dr. József Molnár (ATOMKI) who offered us remarkable insight in the design of the readout system.

References

- [1] *IEEE Standard for FASTBUS Modular High-Speed Data Acquisition and Control System*, 1985.
DOI: 10.1109/IEEESTD.1985.121456.
- [2] *Ieee standard for a versatile backplane bus: Vmebus*, 1988. DOI: 10.1109/IEEESTD.1988.8957719.
- [3] R. Dettmer, "The VXI bus-an open standard for modulator instrumentation," *IEE Review*, vol. 35, no. 9, pp. 327–330, 1989.
- [4] G. Páll et al., "The grid-geometry time-of-flight detector used in the NA49 experiment at the CERN-SPS," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 451, no. 2, pp. 406–413, 2000. DOI: 10.1016/S0168-9002(00)00318-1.
- [5] *IEEE Standard Modular Instrumentation and Digital Interface System (CAMAC)*, 1975. DOI: 10.1109/IEEESTD.1975.7431915.
- [6] *Raspberry pi 3b+*. [Online]. Available: <https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-3-model-b-plus/>.
- [7] *Mcp23017, 16-bit i/o expander with serial interface*, pp. 1–40. [Online]. Available: <https://ww1.microchip.com/downloads/aemDocuments/documents/APID/ProductDocuments/DataSheets/MCP23017-Data-Sheet-DS20001952.pdf>.
- [8] *Ecl 10k and 100k logic families*, 1986, p. 720. [Online]. Available: https://bitsavers.org/components/philips/_dataBooks/1986_IC08_

Philips _ ECL _ 10K _ and _ 100K _ Logic _ Families.pdf.

- [9] *Fast ttl logic series*, 1986, p. 916. [Online]. Available: https://bitsavers.org/components/philips/_dataBooks/1986_IC15_Philips_FAST_TTL_Logic.pdf.
- [10] *Mc10124, quad ttl to ecl translator*, pp. 1–8. [Online]. Available: [https://project-cms-rpc-endcap.web.cern.ch/rpc/Chambers/Components/Electronics/LVDS%20to%20NIM%20module / MC10124P % 20pdf , %20MC10124P % 20Description , %20MC10124P % 20Datasheet, %20MC10124P%20view%20_%20ALLDATASHEET%20____.pdf](https://project-cms-rpc-endcap.web.cern.ch/rpc/Chambers/Components/Electronics/LVDS%20to%20NIM%20module/MC10124P%20pdf,%20MC10124P%20Description,%20MC10124P%20Datasheet,%20MC10124P%20view%20_%20ALLDATASHEET%20____.pdf).
- [11] *Mc10125, quad mecl to ttl translator*, pp. 1–8. [Online]. Available: <https://www.farnell.com/datasheets/103015.pdf>

Security issues in multimedia IP networks

Gergő Juhász¹, Róbert Sándor Kovács²

¹Obuda University, Doctoral School of Security Science, József körút 6., Budapest, 1088, HUN, juhasz.gergo@kvk.uni-obuda.hu

²Obuda University, Kandó Kálmán Faculty of Electrical Engineering, Institute of Electronics and Communication Systems, Department of Telecommunications and Infocommunications, Bécsi út 96/B, Budapest, 1034, HUN, kovacs.robert@kvk.uni-obuda.hu

Abstract: One of the most important elements of 21st century communications is multimedia IP communication. These networks enable high-quality content to be delivered cost-effectively from the service provider to users. With the growing popularity of this technology, the number of cyber threats and attacks targeting it has also increased dramatically. Since the IP networks used to transmit media content use the same protocols as those used for data communication, the same potential vulnerabilities exist. Due to the network architecture, vulnerabilities are not limited to home networks and content sources; attacks can also affect the core network and the delivery and distribution network. This means that in order to ensure IT security, procedures and systems must be developed to defend against attacks affecting every layer of the TCP/IP layer model. When implementing these methods, it is also important to keep in mind the principle that the user experience should not be compromised, which is why real-time criteria must be ensured. In the case of multimedia IP networks, it is not only necessary to take into account classic cyber-attacks, but also to implement appropriate rights management (subscription management) on the user side and user data protection on the service provider side. [1] From the above, we can see that these multimedia networks play a significant role in our age, which makes their IT security and research a key priority. In my article, I will discuss these cybersecurity issues and related research.

Keywords: multimedia, IP, IPTV, cybersecurity, communication

1 Introduction

IP-based multimedia content delivery has become one of the most important pillars of global mass communication today. Streaming platforms, IPTV broadcast networks, cloud-based video sharing platforms, and interactive multimedia applications are now the primary means of accessing information worldwide. Users are increasing their consumption of video, audio, and interactive content,

which they access via IP-based networks. The rapid spread of multimedia content delivery is significant not only in economic and technological terms, but also in terms of social and national security.

The primary requirement for modern streaming services is stable, fast, and reliable data transfer, which is ensured by QoS (Quality of Service). However, maintaining QoS is a significant challenge, as real-time multimedia content transfer is highly sensitive to network latency, jitter, and packet loss. Optimizing QoS parameters is therefore one of the most important challenges and a key area of research today, especially for video streaming systems that require high bandwidth and transmission speeds. [2]

Because multimedia IP networks use the same TCP/IP protocols as all other Internet services, they also have their own vulnerabilities. In addition, the specific architecture of streaming and IPTV services, which consists of CDNs, servers, and compression methods, as well as protocols that ensure real-time performance, carries with it additional attack surfaces. The issue of ensuring their secure operation is therefore multifaceted: it affects the layers of the TCP/IP model, content delivery systems, end devices, and user awareness.

The manipulation of multimedia IP infrastructures is especially dangerous in modern information warfare, as streaming systems play a critical role in informing the public. A successful attack (e.g., content replacement, service disruption, disinformation-based news reporting) can cause mass panic or social destabilization. The aim of my article is therefore to review the technological structure of multimedia IP systems, ensure QoS requirements, highlight security challenges, and present my PhD research program, which discusses the protection options for these systems.

2 The evolution of multimedia communication – from analog broadcasting to IP-based platforms

The telecommunications infrastructure of the last century was primarily defined by analog broadcast technologies. Radio and television broadcasting implemented a single-way, centralized content distribution model, which enabled widespread and fast information transfer, but completely lacked interactivity. Users only consumed content provided by the service provider, at specific times, with limited choices.

The appearance of digital broadcasting (DVB-T, DVB-S, and DVB-C technologies) led to significant improvements in quality, but the broadcast model continued to dominate. The breakthrough came with the spread of broadband Internet, which enabled IP-based content distribution. The development of

streaming technologies, improvements in content encoding efficiency, and the expansion of server-side infrastructure gradually replaced traditional broadcasting models.

The foundations of modern multimedia network development are highlighted in numerous studies, which emphasize that IP-based systems are more flexible, efficient, and customizable than traditional broadcast-based solutions. This flexibility has enabled the rapid spread of interactive services (VoD - Video on Demand, rewindable programs, customized program recommendations) and, with it, a complete change in user needs. [3]

3 The workings and architecture of multimedia IP networks

Multimedia IP -based systems are multi-layered, requiring complex infrastructure. After content is produced, server-side systems compress, encode, and upload the video to a CDN (Content Delivery Network) infrastructure, which functions as a geographically distributed network of servers. The purpose of the CDN is to place content close to users geographically, reducing latency and backbone network traffic.

Without CDNs, the quality and performance of streaming services would not be guaranteed, as QoS conditions would be compromised. CDNs provide the core of modern multimedia content delivery, ensuring continuous operation through caching, load balancing, and error management. [4]

Streaming services and IPTV demand a high degree of flexibility. The network structure is often organized in multiple layers:

- Origin servers
- CDN servers
- Local area networks
- User end devices (set-top boxes, smart TVs, mobile devices)

Content distribution takes place in real time and is extremely sensitive to delays and bandwidth allocation. A detailed examination of modern IPTV architectures also shows that integrating security and QoS requirements is a complex task due to the diversity of network devices. [5]

4 The role of QoS in multimedia IP networks

Providing QoS in multimedia IP networks is one of the most important issues in this technology. Streaming services, especially live videos, real-time broadcasts, and high-definition content, are sensitive to any network faults. Unfortunately, this means that minimal delay is necessary to minimize packet loss.

There are several methods for optimizing QoS, among which adaptive resource allocation based on artificial intelligence stands out, as it is capable of reacting to network problems in real time. Predictive, AI-based QoS optimization can significantly reduce packet loss and improve the reliability and speed of multimedia transmission. [2]

The most relevant QoS parameters are:

- Delay – critical in live broadcasts.
- Jitter – particularly important for video and audio synchronization.
- Transmission capacity – important for transferring high-definition content.
- Packet loss – causes quality reduction, especially with high-definition content.

One of the challenges with IP-based multimedia systems is to find the balance between QoS and security. Encryption, authentication protocols, packet verification, and other security procedures can increase latency, degrading the user experience. Service providers must therefore find a compromise that guarantees both network security and high-quality multimedia content. This will be one of the key areas of research in my work.

5 Security challenges in multimedia IP networks

The vulnerabilities of multimedia IP infrastructure can appear on multiple levels: in the layers of the TCP/IP model, in CDNs, in backend systems, in end devices, and in possible illegal user behavior. Due to the popularity of streaming services, the number of cyberattacks against them is also on the rise.

A number of security issues can arise in IPTV and streaming platforms, including::

- Unauthorized access to paid content
- Blocking of information flow (slowing down, interruption)
- Overload attacks

Several studies have reviewed security issues in streaming and IPTV systems in detail, highlighting that these systems are particularly vulnerable due to their complex architecture and real-time operation. [6]

Threats such as content substitution, disinformation manipulation, or service disruption in crisis situations can have extremely serious social consequences. As a result, multimedia IP networks can easily become targets of cyberattacks, affecting the citizens' access to information. [7]

6 The human factor and social vulnerabilities

One of the non-technical aspects of multimedia IP system security that is still one of the most critical factors is human behavior. Users are often unaware of what personal data they enter when registering for streaming services, how profile management and program recommendation systems work, or how important it is to use a strong password and enable two-factor authentication.

One of the key aspects of my PhD research will therefore be a questionnaire survey examining different age groups:

- awareness of the use of multimedia services,
- level of cybersecurity knowledge,
- risky user behavior.

An inappropriate attitude towards our own digital privacy provides a significant attack surface that cannot be completely eliminated by technical measures. Therefore, examining the human factor is an essential part of my research.

7 Technical safety tests

One of the most critical parts of multimedia systems is the CDN, which is directly related to network speed and security. CDNs enable fast access to content, but they can also carry multiple vulnerabilities. Research examining the risks of CDNs highlights that cache manipulation and attacks on geographically distributed server infrastructure represent a serious threat. [4]

Studies of the architecture of streaming systems highlight that real-time content delivery is extremely vulnerable to cyber attacks, and user-side vulnerabilities (e.g., smart TV or set-top box bugs) also represent a significant risk factor. [5][6]

A number of studies analyze in detail the typical parameters and vulnerabilities of IP-based multimedia networks, while research on multimedia processing describes methods for optimizing data stream management and making networks more secure. [8][9]

Based on these, the technological part of my PhD research will include:

- Creating an IPTV test network,
- IP data stream analysis in laboratory and real environments,
- vulnerability tests for user terminal equipment,
- compare encryption and authorization management methods.

8 Structure of my PhD research (2025–2029)

The research is divided into four years and structured as follows:

- Year 1: literature review, questionnaire survey (human factor aspect).
- Year 2: Test network building, IP data stream analysis.
- Year 3: Testing of end devices and analysis of encryption procedures.
- Year 4: development of methodology, recommendations, publications.

The aim is to develop a comprehensive methodology that can examine the safety of all components of multimedia IP systems, applying not only technical but also human factors.

Conclusion

The security of multimedia IP -based systems is of high importance, as these platforms have become the primary channels for information communication. Balancing QoS and security is a complicated task, which is especially challenging for real-time streaming services. Based on the literature reviewed, it can be concluded that multimedia IP networks are vulnerable in several ways and have become targets for cyberattacks due to their significant growth.

The aim of my PhD research is to develop a comprehensive methodology for assessing the security of these systems, applying both technical and human approaches. The results of this research may contribute to increasing the security of multimedia services and reducing social vulnerabilities.

References

- [1] Suliman Mohamed Fati; Saiful Azad; Al-Sakib Khan Pathan, "IPTV Network Security: Threats and Countermeasures," in *IPTV Delivery Networks: Next Generation Architectures for Live and Video-on-Demand Services*, Wiley, 2018, pp.203-224, DOI: 10.1002/9781119397939.ch8
- [2] Qin Xin, Mamoun Alazab, Rubén González Crespo, Carlos Enrique Montenegro-Marin, AI-based quality of service optimization for multimedia transmission on Internet of Vehicles (IoV) systems, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, Volume 52, Part A, 2022, 102055, ISSN 2213-1388, <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102055>.
- [3] Michael Oche, Rafidah Md Noor, Johnson Ihieh Aghinya, Network centric QoS performance evaluation of IPTV transmission quality over VANETs, *Computer Communications*, Volume 61, 2015, Pages 34-47, ISSN 0140-3664, <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2014.12.001>.
- [4] Paul Ganley, Copyright and IPTV, *Computer Law & Security Report*, Volume 23, Issue 3, 2007, Pages 248-261, ISSN 0267-3649, <https://doi.org/10.1016/j.clsr.2007.01.005>.
- [5] Chaeyun Jang, Seongcheol Kim, Kids content as IPTV operator's new differentiator: The Korean case, *Telecommunications Policy*, Volume 48, Issue 6, 2024, 102765, ISSN 0308-5961, <https://doi.org/10.1016/j.telpol.2024.102765>.
- [6] Kristina Irion, Natali Helberger, Smart TV and the online media sector: User privacy in view of changing market realities, *Telecommunications Policy*, Volume 41, Issue 3, 2017, Pages 170-184, ISSN 0308-5961, <https://doi.org/10.1016/j.telpol.2016.12.013>.
- [7] Naoya Sekiguchi, Hidema Tanaka, BGP hijack attack policy against AS topology map, *Internet of Things*, Volume 25, 2024, 101059, ISSN 2542-6605, <https://doi.org/10.1016/j.iot.2024.101059>.
- [8] NianMin Yao, JinZhong Chen, Guaranteed Quality of Service in Multimedia System, *Procedia Engineering*, Volume 24, 2011, Pages 287-291, ISSN 1877-7058, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.11.2643>.
- [9] Li Kuang, Zhifang Liao, Wentao Feng, Haoneng He, Bei Zhang, Multimedia services quality prediction based on the association mining between context and QoS properties, *Signal Processing*, Volume 120, 2016, Pages 767-776, ISSN 0165-1684, <https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2015.01.013>.

Időzírtési problémák kezelése kritikus kommunikációs hálózatokban

Kún Gergely

kun.gergely@kvk.uni-obuda.hu

orcid: 0000-0003-0572-5177

Híradástechnika és Infokommunikáció Tanszék, Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar, Óbudai Egyetem, 1034 - Budapest, Bécsi út 96/b.

KTI – Közlekedéstudományi Intézet, 1119 - Budapest, Than Károly u. 3-5.

Wühl Tibor

wuhl.tibor@kvk.uni-obuda.hu

orcid: 0000-0002-7522-3511

Híradástechnika és Infokommunikáció Tanszék, Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar, Óbudai Egyetem, 1034 - Budapest, Bécsi út 96/b.

KTI – Közlekedéstudományi Intézet, 1119 - Budapest, Than Károly u. 3-5.

Az információs és kommunikációs technológiák gyors fejlődése jelentős hatást gyakorol a kritikus infrastruktúrákat kiszolgáló adathálózatokra, mely rendszerek közé tartoznak a közlekedést támogató megoldások is. Kutatásunk a vasúti közlekedést kiszolgáló biztonságkritikus kommunikációs hálózatokra fókuszál. A hagyományosan hosszú élettartamú és nagy megbízhatóságú vasútspecifikus eszközöket és rendszereket egyre inkább gyorsan fejlődő, folyamatosan változó digitális technológiák váltják fel. Ez az átállás jelentős műszaki és rendszerszintű kihívásokat eredményez a megbízhatóság, a rendelkezésre állás és a tervezett élettartam fenntartása szempontjából. A vasúti alkalmazások speciális követelményei miatt sok, széles körben használt kommunikációs technológia és protokoll vagy alkalmatlan, vagy csak korlátozottan alkalmazható a biztonságkritikus infrastruktúrákban, melyek megértéséhez ismerni kell a vasúti környezetben alkalmazott megbízhatósági kritériumokat és feltételeket. A magas megbízhatóság eléréséhez szükséges a hálózatot fenyegető kockázatok szisztematikus elemzése is. A releváns szabványok foglalkoznak a lehetséges kockázati tényezőkkel és azok kezelésével, de nem teljes körűen, így további kutatások szükségesek a jövőbeli vasúti kommunikációs hálózatok magas megbízhatósági szintjének biztosításához.

Kulcsszavak: vasút, kritikus, kommunikáció, késleltetés, szinkronizáció, megbízhatóság

1. Bevezetés

A korszerű vasúti rendszerek biztosító berendezései, valamint a vonatbefolyásoló rendszerek komponensei is digitális infokommunikációs infrastruktúrát használnak a kommunikációra. Ezen és hasonló ipari rendszerek működésbiztonságának megvalósítása korunk jelentős kihívásai közé tartozik.

A vasúti közlekedés teljes automatizálását és biztonságának növelését az Automatic Train Control (ATC) rendszerek fejlesztése szolgálja. Ezek a korszerű, számítógép-alapú vasút-felügyeleti integrált rendszerek nemcsak a pályaelemek, hanem a járművek és a forgalom teljes körű irányítását és felügyeletét is lehetővé teszik. Az ATC rendszerek világszerte számos országban működnek, különböző változataik léteznek és számos vasúti és metróhálózatokon találhatók meg. [1]

Európában az European Train Control System (ETCS) kiépítése zajlik, mellyel – a megvalósított szinttől függően – valós időben nyomon követhető a vonatok pozíciója, állapotadatai, továbbá a közlekedésükre vonatkozó utasítások is továbbíthatók, ezzel biztosítva a vasúti közlekedés akár teljes körűen automatizált, biztonságos és hatékony működését. A GSM-R (Global System for Mobile Communications – Railway) biztosítja az ETCS által igényelt vezetéknélküli kommunikációs infrastruktúrát, amely a modern vasúti forgalomirányítás egyik legfontosabb eleme. A GSM, bár kiforrott és robusztus technológia, napjainkban viszont már elavultnak tekinthető. Az 5G mobil kommunikáció már a jelen és a közeli jövő technológiája, amely a vasúti kommunikáció következő generációját I képviseli: FRMCS (Future Railway Mobile Communication System) néven lesz a GSM-R utódja. [2,3]

2. Vasúti kommunikációs rendszerek

2.1. Számítógép alapú biztosítóberendezés

A vasúti biztosítóberendezések fejlesztésének és alkalmazásának elsődleges célja mindig a vasúti közlekedés biztonságának és hatékonyságának növelése. A számítógép alapú biztosítóberendezés (Computer Based Interlocking - CBI) rendszere a biztosítóberendezési funkciókat megvalósító központi szerverből, a terepi eszközökből és az ezeket összekötő hálózathoz áll. A leggyakrabban CBI-nek nevezett szerver az adott területet kiszolgáló biztosítóberendezés rendszer központja.

A számítógépes biztosítóberendezések általában két részből állnak: az egyik rész a biztonsági funkciókat valósítja meg, rájuk vonatkozó követelmények közel hibamentes működést írnak elő (SIL4 szint). A másik rész az úgynevezett „nem

létfontosságú” funkciókat valósítja meg, mint például a kézi beavatkozó eszközök, állapotjelzők, visszajelző monitorok üzeme.

A biztosítóberendezés központjában a pályamenti biztosítóberendezések információinak gyűjtése, kiértékelése történik, és beavatkozásokat hajtanak végre az előírt és biztonságos vonatközlekedési követelményeknek megfelelően.

Egy vasúttársaságnak rendszerint több biztosítóberendezés központja van, melyek egy-egy terület ellátásért felelősek. Az egyes területek biztosítóberendezéseinek szerverei össze vannak kötve egymással információcsere céljából, de a fő feladatuk a saját régiójuk biztonságának és folyamatos üzemének biztosítása. [1]

2.2. Központi Forgalmellenőrzés

A Központi Forgalmellenőrzés (KÖFE) nagyobb forgalmi körzetek, csomópontok, illetve hosszabb vonalszakaszok gépi úton megtámogatott, központból történő forgalmi állapotellenőrzését valósítja meg, de a forgalom irányítása helyi kezeléssel történik [4].

2.3. Központi Forgalomirányítás

A Központi Forgalomirányítással (KÖFI, vagy CTC - Centralized Traffic Control) lehetővé válik a vasúti járművek mozgásának távoli felügyelete, irányítása egy központi vezérlőhelyről. A központi forgalomirányító rendszer az általa felügyelt területen belül irányítja a vonatközlekedést és a tolatási műveleteket. A rendszer a biztosító berendezéseken keresztül biztosítja a központi vezérlést. A KÖFI elsődleges célja a vasúti közlekedés hatékonyságának és rugalmasságának növelése.

A KÖFI rendszer egy központi forgalomirányító központból áll, ami összeköttetésben áll tipikusan az állomási biztosítóberendezésekkel. A forgalomirányító személyzet számítógépes felületen keresztül figyelemmel kíséri a vonatok mozgását, módosíthatja azokat a biztosítóberendezéseken keresztül a jelzők és váltók állapotának változtatásával. Az információátvitel történhet többféle fizikai közegen és technológiával. Jelenleg a korszerű IP-alapú rendszerekre való áttérés a jellemző és ez kutatásunk fő irányvonala is.

A KÖFI rendszer decentralizált és autonóm tervezési elvekre épül, elosztott számítási és vezérlési technológiát alkalmaz. Ennek köszönhetően képes térben és időben azonosítani a vonatközlekedés és a tolatási műveletek során fellépő problémákat, valamint a szükséges műveleti korrekciókat a tervezett ütemezéshez igazítva végrehajtani. Ezáltal biztosítja a közlekedési és tolatási folyamatok hatékony és összehangolt vezérlését.

2.4. Egységes Európai Vasúti Közlekedésirányítási Rendszer

Az ERTMS (European Railway Traffic Management System), azaz Egységes Európai Vasúti Közlekedésirányítási Rendszer célja, hogy megvalósítsa az országhatárokon átívelő egységes vonatfelügyeletet és irányítást minden aspektusból.

Az ERTMS egyik része az ETML (European Traffic Management Layer), mely a forgalommenedzsment és forgalomirányítási feladatok megoldását jelenti.

A másik rész az EIRENE (European Integrated Railway Radio Enhanced Network), ami a rádiós kapcsolat megoldását jelenti a fedélzeti és a pályamenti eszközök között. Ez jelenleg a GSM-R rendszert jelenti, és jövőbeli tervek szerint az 5G alapú FRMCS lesz.

A harmadik része az ETCS, amit a következő rész tekint át.

2.5. Európai egységes vonatbefolyásoló rendszer

Az egy rendszerbe integrált rendszerelemek komplex szolgáltatásokat nyújtanak a vonatirányítás számára. Ezt igyekeznek megvalósítani Európában az ETCS (European Train Control System) automatikus vonatbefolyásoló rendszer, ami jelenleg is kiépítés alatt áll. Ennek a rendszernek az elsődleges feladata legkülönbözőbb üzemi helyzetekben a vonatforgalom felügyelete és biztonságának garantálása.

2.6. ETCS kiszolgáló rendszerelemek

2.6.1. Balíz, LEU

A balíz egy olyan eszköz, amely elektromágneses elven működik, és adatokat továbbít a felette elhaladó mozdony számára. A balízek a sínek között, fixen vannak elhelyezve. A kiolvasást tekintve teljesen passzív eszközök, a bennük eltárolt információ továbbításához szükséges energiát az elhaladó mozdony balíz olvasó egysége (Balise Transmission Module - BTM) szolgáltatja induktív módon. Az átadott adatok többek között lehetnek például kilométerszelvényre, haladási adatokra, fékezési parancsokra, jelzőképekre vonatkozó adatok.

A balízek a pontszerű vonatbefolyásolás alapvető elemei, ami részben a később ismertetett ETCS Level 1-hez tartozik.

Alapvetően kétféle balíz létezik: fix és vezérelt balízek:

- A fix balízkok csak statikus adatokat tudnak továbbítani. Általában a pontos helymeghatározáshoz szükséges információk továbbítására használják őket.
- A vezérelt balízkok változó adatokkal dolgoznak, melyeket a LEU, avagy pályamenti elektronikus egység (Lineside Electronic Unit) vezérli. A LEU a biztosítóberendezés és a vezérelt balíz közötti információcserét valósítja meg. Pl. térköz határon a jelzőképet és az új menetengedélyt továbbítja a szerelvény számára. Jellemzően az ETCS 1-es szintjén használják, mivel ez a működési mód kizárólag pontszerű vonatbefolyásolást valósít meg.

Az ETCS 2-es és 3-as szinteken rádiós interfészen keresztül juttathatók el a vonatbefolyásoláshoz szükséges fix és változó információk a járművekre. A balízkok feladata ezeken a szinteken már nem a változó jelzési képek átvitele, ellenben a pontos helymeghatározásban veszik ki a részüket, mint egyfajta stabil, fix kilométerkövek.

2.6.2. GSM-R

Az ETCS 2-es szint bevezetésével a vonat és a pályamenti berendezések, illetve központok közötti folyamatos kommunikáció iránti igény vált szükségessé. Ennek kiszolgálására olyan rádiós technológiára volt szükség, amely nagy területek lefedésére alkalmas, megbízható, robusztus és cella alapú. A választás akkor egyértelműen a polgári alkalmazásban már jól bevált GSM technológiára esett. A GSM-R (Global System for Mobile Communications – Railway) speciálisan vasúti célú cellás földi mobil rádiórendszer, melynek szolgáltatási területe lefedi a kiépített ETCS 2-es és 3-as szintű vonalszakaszok teljes hosszát. Ez a rendszer a GSM mobiltelefon-technológia vasúti adaptációja. Célja, hogy akár világszinten egységes, megbízható és biztonságos kommunikációs csatornát biztosítson a vasúti személyzet és a vasútirányítás részére. Jelenleg elsősorban az ETCS rendszer kommunikációs hordozószolgáltatása, mivel biztosítja az adatátviteli csatornát a vonat és a földi infrastruktúra közötti kommunikációhoz, amely elengedhetetlen a vonat pozíciójának követéséhez, az automatikus sebességszabályozáshoz, menetengedélyek kiadásához és további biztonsági funkciókhoz.

A GSM-R alapvető célja volt, hogy helyettesítse a korábbi, nemzetközi szinten nem egységes és általában inkompatibilis vasúti rádiórendszereket. Ennek köszönhetően lehetővé teszi az egységes kommunikációt a különböző országok vasúti hálózatai között is. Alkalmazása az európai országokban kötelező a főbb nemzetközi vonalakon TEN-T (Trans-European Transport Network), de találunk GSM-R rendszert Európán kívül Kínában, Indiában, Dél-Afrikában, Ausztráliában és a Közel-Keleten is [5,6,7].

A GSM-R fokozott biztonsági protollokkal rendelkezik, amelyek biztosítják, hogy a kommunikáció megbízható és zavartalan maradjon, még nagy sebességű vonatok esetében is. A rendszer támogatja a folyamatos és valós idejű kommunikációt egyrészt a vonatok (mozdonyok) és a pályamenti biztosító és vonatvezérlő rendszerek, másrészt a vasúti személyzet között. [8]

Rádiós lefedettségnek szakadásmentesnek kell lenni, mert a rádiós rendszer feladata, hogy az adott területet kiszolgáló RBC (Radio Block Center) központ és a közlekedő, ETCS képes, vonatok között folyamatos adatkapcsolatot tartson fent. A kapcsolat megszűnése esetén – rögzített időzítés letelte után – előre definiált reakcióra (pl. vészfékezésre) kényszerítik a vonatot.

A GSM-R rádióhálózat RBC-kből, bázisállomás-vezérlőkből és bázisállomásokból áll. Ez a pályamenti és a fedélzeti berendezések közötti kommunikáció hordozószolgáltatása.

2.6.3. Future Railway Mobile Communication System

A GSM-R az 1990-es évek technológiájára épül, és bár robusztus és megbízható, kezd már elavulni. Adatátviteli képességei (kis adatsebesség és viszonylag magas késleltetés) korlátozzák az újabb vasúti alkalmazások támogatását.

Jelenleg már egyértelműen az 5G-alapú FRMCS tekinthető a jövő vasúti mobilkommunikációs rendszerének, amely a GSM-R rendszer helyébe lép. Az FRMCS átviteli képességei jelentősen meghaladják a GSM-R technológia képességeit. Az EU tervei szerint hamarosan kezdődhet a bevezetése. A szabványosítás már elért egyféle készültségi fokot és a rendszer tesztelését már több helyen megkezdtek, ugyanakkor továbbra is kihívást jelent a vasúti kommunikációra jellemző, magas megbízhatósági követelmények maradéktalan teljesítése.

Átmeneti fejlesztési irányvonalnak vehetjük a 4G alapú megoldást, azaz az LTE-R (Long Term Evolution – Railway) rendszerét, ami rádiós szempontból részben kompatibilis a későbbiekben megvalósuló 5G alapú hálózatokkal. [9]

2.6.4. Rádiós irányítóközpont

Az ETCS 2-es és 3-as szintjében jelenik meg a rádiós irányítóközpont (Radio Block Center – RBC), ami a vasúti automatikus vonatbefolyásoló rendszer pályamenti központi berendezése. Egy pályahálózat-működtető társaságnak több RBC-je is van (hasonlóan a CBI-khez), számuk az RBC-k kapacitásának függvénye, hogy mennyi vonatot képesek egy időben nyilván tartani (tipikusan 50-100, de ez sok tényezőnek a függvénye). Egy RBC kapcsolatban van a szomszédos RBC-kkel, és összeköttetésben lehet az adott területért felelős biztosítóberendezés szerverével (CBI), a központi forgalomirányítással (CTC – Centralized Traffic Control) és esetleg más elemekkel.

Az RBC-k feladata többek között a szerelvények menetengedélyeinek kezelése, vezérlőparancsok generálása a biztosítóberendezés és a pályamenti eszközök információinak felhasználásával, és ezek rádiós továbbítása a GSM-R hálózaton keresztül a fedélzeti berendezés felé.

2.6.5. Az ETCS szintjei

Az ETCS rendszer bevezetése fokozatosan történik, mindenhol a korábbi, különböző nemzeti rendszerek mellett működik. Az ETCS rendszernek szolgáltatási képességei szerint három szintje van. Jelenleg a kettes szint használata és kiépítése zajlik a legtöbb helyen. Európában – és az országokon belül is – vannak vonalak, ahol már kiépítésre került a rendszer valamelyik szintje és vannak vonalak, ahol még nem. [2,10] A következő részekben összefoglalás olvasható az egyes szintek főbb tulajdonságairól.

1. szintű ETCS

Az ETCS rendszer 1-es szintje (L1 – Level 1) csak úgynevezett pontszerű vonatvezérlést tud megvalósítani, ez a szint a hagyományosnak mondható biztosítóberendezéseken alapul.



1. ábra

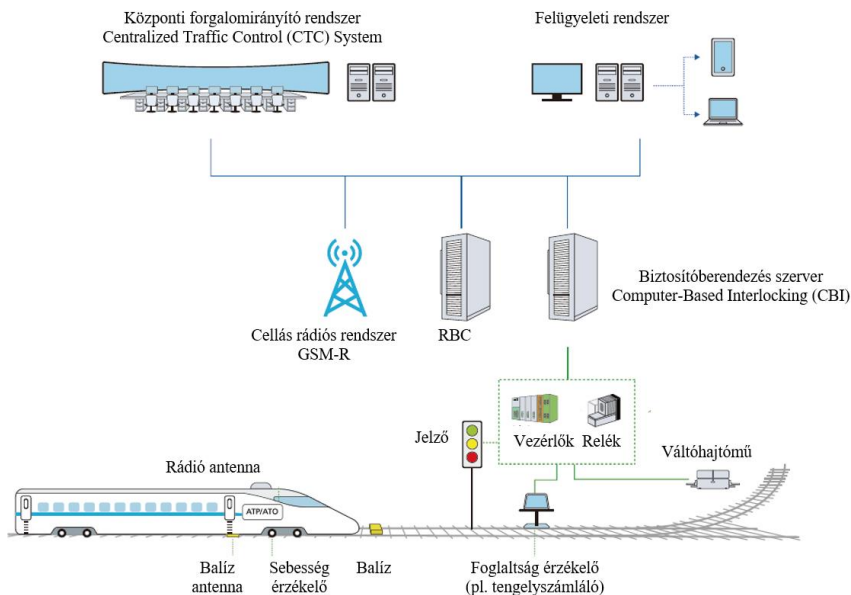
Az 1-es szintű ETCS csak pontszerű vonatvezérlést valósít meg [11]

Az 1. ábrán egy lokálisan megvalósított kommunikációs példa látható, amelynek során az aktuális jelzőkép a vonatra kerül továbbításra; az ábrán megjelenik egy LEU, valamint balízek is, mint az ETCS 1-es szintjének jellemző rendszerelemei. Ebben a változatban korszerű kommunikációs adatátviteli módok nem alkalmazottak, így ez nem képezi kutatsunk fókuszát.

2. szintű ETCS

A 2. szintű ETCS (ETCS L2) is hagyományos biztosítóberendezéseken alapul, azaz a vonatérzékelést továbbra is sínáramkörökkel vagy tengelyszámlálókkel valósítják meg. A biztosítóberendezés kapcsolatban áll az RBC-vel, ami működési területén belül kezeli a vonatok menetengedélyeit, automatizálva a közlekedésüket. A menetengedélyek, vezérlési- és állapotinformációk a GSM-R hálózaton keresztül jutnak el a szerelvények mozdonyaihoz. Állapotinformációk

terén a legfontosabb a vonatok helyzete. Az ETCS L2 képes mozdony részben a meghaladott balizokból kiolvasott adatokból állapítja meg a helyzetét és továbbítja az RBC felé. A mozgásparamétereket a balizokból kinyert helyinformációk mellett a mozdonyban található odométer, GPS vevő, gyorsulásmérő, giroszkóp is szolgáltatja. A 2. ábra egy tipikus felépítésű ETCS L2 rendszert szemléltet.



2. ábra

2-es szintű ETCS rendszer blokkvázlata [12]

3. szintű ETCS

Az ETCS 3. szintje a jelenlegi legmagasabb szintű szolgáltatásokkal bíró változat. Ezzel a rendszerrel a rádiós vonatvezérlés teljes mértékben megvalósul: a folyamatos sebességfelügyelettől kezdve, az elméletben jó ötletnek tűnő mozgó blokkos rendszerig (fix térközös megoldás helyett). Ezen a szinten lehetőség van a jelzőberendezések teljes elhagyására is (a mozdonyvezető is elméletileg feladat nélkül marad). A fedélzeti elemek számára új feladatként jelenik meg a vonatintegritás ellenőrzése, ezzel új követelményszint jelenik meg a fedélzeti kommunikáció terén, mivel a mozdonyra kapcsolt vagonok is belépnek a fedélzeti kommunikációba. és folyamatos kommunikációs kapcsolatban állnak a mozdonyban kialakított integritást felügyelő rendszerelemmel. Ezzel a pályamenti eszközök száma csökken, így a fenntartási költségek terén is jelentős megtakarítás érhető el. Jelenleg ez a szint még nem került üzemzerű alkalmazásba sehol. Legnagyobb kihívás ennél a szintnél a vonatintegritás infrastruktúrájának kialakítása, továbbá a pályamenti-vonat kommunikációs hálózat olyan szintű

megbízhatósága, hogy a pályamenti eszközök elhagyása és ezzel együtt az emberi felügyelet megszüntetése ne okozza a biztonsági színvonal csökkenését. Pilot projektek vannak e téren Európa szerte. [13]

3. Megbízható hálózatok megvalósítása

Vasúti alkalmazások esetében sok, egymástól elkülönülő rendszer együttműködése valósítja meg a különböző feladatokat. Ennek oka, hogy az egyes funkciók fontossága, a rájuk vonatkozó követelmények különbözőek, rendszerint eltérő biztonsági követelményekkel is rendelkeznek.

3.1. Redundáns adatátvitel megvalósítása

Kommunikációs téren, ha folyamatos és megbízható adatátvitelt szeretnénk biztosítani, bizonyos fokú redundancia lesz a kézenfekvő megoldás, amivel egy meglévő rendszer megbízhatósága is jelentősen növelhető.

A redundancia nem feltétlenül jelenti az adott eszközök duplikációját. Hálózati kommunikáció esetében a duplikáció kiváltható a legtöbb esetben gyűrű topológiával, ami nagymértékben képes emelni a rendelkezésre állást és költséghatékony megoldás is. Gyűrűs szerkezet esetén, ha a gyűrűben egy kapcsolat megszakad, az adott csomópont a másik irányban továbbra is elérhető marad. Bár a hibásan működő kapcsoló és a hozzá kapcsolódó eszközök persze kiesnek a kommunikációból, de a hálózat többi része és eszközei tovább működhetnek és kommunikálhatnak. A gyűrűs topológiákban az alkalmazott kapcsolási protokollnak képesnek kell lennie a hálózatban lévő hurok kezelésére, és hiba esetén a megfelelő és gyors helyreállítási képessége a fontos.

Biztonságkritikus rendszerekben, milliszekundum nagyságrendben, vagy az alatt kell a helyreállítási időnek maradni. A PRP (Parallel Redundancy Protocol) és a HSR (High-availability Seamless Redundancy) protokollok [14,15] ezt az elvárást maradéktalanul teljesítik, és zero helyreállítási időt produkálnak.

3.2. A késleltetési kérdések

Az egyre nagyobb sebességű vasutak esetén a kommunikációs hálózat késleltetésének nagysága egyre fontosabb kérdés. Létfontosságú, hogy a valós pályainformációk, sebességadatok és menetengedélyek időben a fedélzeten legyenek, mert egy vonat egy másodperc alatt akár több 10 métert is haladhat. A szükséges adatok késedelmes megérkezése felesleges vészmegállításhoz, rosszabb esetben balesethez is vezethet.

Napjaink kihívása, hogy a korábban alkalmazott szinkronizált időosztásos hálózatok helyett az összes kommunikációs hálózat tekintetében csomagkapcsolt hálózatok kerülnek kiépítésre. Csomagkapcsolt környezetben az átviteli késleltetés nagysága nem nyilvánvaló, mivel az a csomagok változó kezelési időigényein alapulnak. Ezzel szemben a régi szinkron rendszerekben ez a paraméter csak egy egyszerű konstans érték volt. A vasúti kommunikációs hálózatok esetében kulcsfontosságú tényező, hogy olyan hordozó szolgáltatások és protokollok kerüljenek kiválasztásra, amelyek képesek kielégíteni és folyamatosan biztosítani az időzítési követelményeket. [2]

Egy hálózat determinisztikus viselkedését leginkább az átviteli idő előre való kiszámíthatósága és garantálása adja. Ezt a kritikus hálózatok esetén mindenképp biztosítani kell. Azonban a hálózat determinisztikussága időbeli skálán nem csak az adott technológia által nyújtott alacsony késleltetésértéktől függ, hanem beletartozik ebbe a kapcsolatfelépítéshez szükséges idő, a torlódások és útválasztásokhoz szükséges időtartamok is.

A szabvány által kezelt késleltetést érdemes tovább bontani, hogy a kommunikációban résztvevő részrendszerekre megfelelő követelményeket lehessen megfogalmazni.

Tehát az alapvető üzenet-hibák közül a késleltetést több összetevő eredőjeként kell kezelni és részrendszerekre bontva meghatározni az alábbi késleltetési veszélyforrások hatását és lehetőség szerinti csökkentésének módjait:

- kapcsolat kiépítési idő, vagy késleltetés,
- átviteli késleltetés,
- forgalmi túlterhelésből eredő késleltetés,
- linkhiba, hálózati hiba esetén helyreállási idő,
- mobilitásból származó késleltetések (pl. handover).

Például az ETCS 2-es szint esetén a T_NVCONTACT paraméter a mozdony fedélzeti berendezése és a pályamenti Radio Block Centre (RBC) közötti kommunikáció szüneteinek maximálisan megengedett idejét határozza meg. Ez azt jelenti, hogy a mozdony által fogadott legutóbbi üzenet időbélyege és a fedélzeti aktuális idő közötti különbség nagyobb, mint ezzel a paraméterrel meghatározott érték, akkor a fedélzeti rendszernek végre kell hajtania a pályamenti rendszer által az M_NVCONTACT paraméterben meghatározott reakciót (pl. vészfékezést vagy fékezést). Az időlimit értéke nincs meghatározva a vonatkozó subsetben [16], ez Magyarországon, a nemzeti előírások szerint, 18 másodperc.

Ez időtartam alatt – a legrosszabb esetet feltételezve – a kommunikációs rendszernek képesnek kell lennie az átviteli csatorna újbóli felépítésére. Ennek

során a GSM-R rendszernek biztosítania kell a rádiós csatornát, valamint az RBC felé irányuló kapcsolatot az aggregációs hálózaton keresztül.

3.2.1. Késleltetés

Magas késleltetés értékek problémát jelentenek a valós idejű alkalmazáskor, ahol a haladó vonat számára fontos menetengedélyek, forgalmi utasítások időben kell, hogy megérkezzenek. Magas értékű késleltetéseket a hálózati torlódások, az útválasztás magas protokoll rétegbeli megvalósítása, az algoritmusok lassúsága okozhat. Hálózati hiba esetén a redundáns útvonal kiépítése miatti késlekedés is lehet számottevő.

3.2.2. Késleltetés ingadozás

Késleltetés ingadozás (jitter) a csomagalapú IP hálózatok alapvető tulajdonsága, ha csak hálózati réteg alap funkcionalitását tekintjük. A best-effort jellegű csomagátvitel esetén nincs garancia a csomagok időbeli kezelésére, időben egyenletes továbbítására.

3.2.3. Hálózati szinkronizáció

Időszinkron hibák, azaz a hálózati elemek közötti időszinkron megszakad, az eszközök eltérő időt látnak, emiatt az időkritikus műveletek, a prioritáskezelés, stb. nem megfelelően működik.

A kifutóban lévő SDH (Synchronous Digital Hierarchy) hordozó hálózatok ezekre a problémákra mind megoldást nyújtottak, de az Ethernet-IP alapú hálózatok többszolgáltatásai, rugalmas konfigurálhatósága miatt egyre inkább kiszoruló félben vannak. Az SDH hálózatok elemei szigorú időszinkronban voltak egymással, központi óra ütemében dolgozott a hálózat összes eleme, ezzel megbízható alapot adott az időkritikus alkalmazásoknak. Stabil hálózati kapcsolatot biztosított redundanciával, gyors helyreállítással, alacsony késleltetéssel és jitterrel, amik miatt speciális esetekben még a fentiek ellenére sem kerültek leváltásra.

Az időszinkron megléte az FRMCS esetében alapvető fontosságú. Ez az 5G alapú mobil hálózati technológia rádiós időosztásos rendszere precíz időszinkron nélkül képtelen működni [17,18,19].

Az időszinkron kezelése nagyon fontos probléma az Ethernet-IP alapú hálózatokban, mert alapvetően a hálózat jellege aszinkron, viszont a determinisztikus működéshez fontos az időszinkron megléte, ami egyébként a korábbi generációs szinkron SDH hálózatokban meg is volt. Ha időszinkronizációs hiba van jelen, az eszközök nem ugyanazt az időt „látják”, belső óráik eltérnek egymástól, aminek hatására rosszul időzítik az üzeneteket.

A hálózati elemek szinkronizációs eltérései fokozatosan alakulhatnak ki, ha az időalap lassan, de folyamatosan egyre inkább eltér a referenciaértéktől. Ez az időbélyegek eltolódását, jitter növekedést vagy más időzítési inkonzisztenciákat okozhat. Az ilyen eltérések különösen az időkritikus kommunikációs és vezérlési folyamatokban veszélyesek. Ezért volt jó a klasszikus SDH rendszerekben, hogy a szinkronitást a hálózat működőképessége magában hordozta. Jelenleg ezt a PTP (Precision Time Protocol) és egyre inkább a TSN (Time-Sensitive Networking) megoldások szolgáltatják az aszinkron alaptulajdonságú IP alapú átvitel felett.

4. Következtetések

Az előírások és szabványok a legtöbb esetben nem konkrét technológiák használatát írják elő, hanem csak minőségi mutatókat, tervezési irányelveket adnak meg. Napjainkban a technológia gyors fejlődése miatt a biztonsági irányelveket megfogalmazó szabványokba sok esetben nem is érdemes konkrét technológiákat belevenni, mert hamar elavulttá válhatnak. Erre példa a GSM-R előírása az európai tagországoknak, ami jelenleg módosítás alatt áll és következőként az FRMCS-t írja elő a vasúti rendszerek kötelezően használandó rádiós hordozószolgáltatásként. Erre a kivételre abból a szempontból van szükség, hogy Európa-szerte a globális átjárhatóságot biztosan meg lehessen valósítani.

A cikkben áttekintésre kerültek jelenlegi és jövőbeli kommunikációs technológiák és megoldások, amelyek alkalmasak lehetnek az egyre szigorúbb követelmények teljesítésére. A technológiaváltás ugyanakkor új kihívásokat is felvet, amelyekkel a korábbi, egyszerűbb megoldások esetében még nem kellett számolni.

Bemutatásra kerültek a vasúti kommunikációs hálózatokat érintő teljesítménymutatókat befolyásoló műszaki jellegű veszélyforrások. Az áttekintés célja a hibatípusok és a kritikus rendszerelemekre jelentett kockázatok pontosabb azonosítása volt, amely alapot nyújt a nagy megbízhatóságú vasúti kommunikációs architektúrák kialakításához. Ennek során kiemelten fontos a redundancia és szinkronizáció megfelelő tervezése, valamint a késleltetés minimalizálása, hiszen ezek a tényezők fontos szerepet játszanak a kritikus adatok megbízható és időben történő továbbításában a biztonságkritikus rendszerekben.

Köszönetnyilvánítás

Köszönjük az Óbudai Egyetemnek és a Közlekedéstudományi Intézetnek kutatásunk támogatását.

Források

- [1] P. Bacsoni, “Vonali biztosítóberendezések”, MÁV Szolgáltató Központ Zrt. Baross Gábor Oktatási Központ, Budapest, 2019, ISBN 978-963-9852-34-1
- [2] MÁV Feltétfüzet, „Az ETCS L1 és L2 pályamenti alrendszerére vonatkozó alkalmazási követelményeire, 0.1.1. verzió, MÁV P-5600, 2008.
- [3] B. Jóvér, “ETCS, Az Egységes Európai Vonatbefolyásoló Rendszer”, MÁV Szolgáltató Központ Zrt. Baross Gábor Oktatási Központ, Budapest, 2006
- [4] G. Tarnai: “Távvezérlés, KÖFE, KÖFI”, BME Közlekedésautomatikai Tanszék, 2012
- [5] „GSM-R Frequencies India” Chapter 8 Mobile communications – GSM-R. Indian Railways. May 2012.
- [6] Australian Railway Association, „Australian Rail Industry Submission to the Minister for Broadband, Communications and the Digital Economy 1800 MHz Spectrum Licenses”. March 2019.
- [7] Lin Junting¹, Dang Jianwu¹ and Min Yongzhi. „NGCTCS: Next-generation Chinese Train Control System”, Journal of Engineering Science and Technology Review, pp. 122- 130, 2016.
- [8] D. Maros, D. Tokody, Zs. Tiszavölgyi, „A GSM-R rendszer jelene és jövője”, Vezetékek világa 2015, pp. 17-21. 2015.
- [9] K. Smith, “Beyond GSM-R: the future of railway radio”, International Rail Journal. Simmons-Boardman Publishing Inc., 2017. https://www.railjournal.com/in_depth/beyond-gsm-r-the-future-of-railway-radio/ (letöltve: 2024.09.11.)
- [10] D. Kurhan, et al., “Development of the High-Speed Running of Trains in Ukraine for Integration with the International Railway Network”, Acta Polytechnica Hungarica, Vol. 19, No. 3, pp. 207-218, 2022
- [11] Kapsch, “European Railway Traffic Management System - ERTMS”, White paper, 2020.
- [12] Hollsys whitepaper, “ERTMS/ETCS LEVEL 2 Solution”, Beijing, China, 2023. <https://www.hollsys.com/cms/show-754.html> (letöltve: 2024.06.23.)
- [13] E. Kretschmer: „ETCS Hybrid Level 3”. In: Jochen Trinckauf, Ulrich Maschek, Richard Kahl, Claudia Krah (Hrsg.): „ETCS in Deutschland”. 1. Auflage. Eurailpress, Hamburg 2020, ISBN 978-3-96245-219-3, S. 351–360.
- [14] IEC 62439-3:2021, “Industrial communication networks – High availability automation networks - Part 3: Parallel Redundancy Protocol (PRP) and High-availability Seamless Redundancy (HSR)”, 2021.

- [15] M. Ostertag, “Seamless Redundancy with PRP and HSR”, 2022.
- [16] SUBSET-026, „System Requirements Specification”, Chapter 3, Principles, REF :SUBSET-026-3, ISSUE:4.0.0, 05/07/2023
- [17] K. Mészáros, T. Wühl, P. J. Varga, S. Gyányi, R. Kovács, M. T. Baross, and G. Kún, “RF kutatások a Kandón, kiemelten 5G vonatkozásában”, in XXXVIII. Kandó Konferencia 2022 - Absztrakt kötet, 2022, pp. 53–53.
- [18] R. Kovács, P. J. Varga, G. Kún, S. Gyányi, T. Wühl, and K. Mészáros, “5G hálózatok strukturáltsági vizsgálata” in XXXVIII. Kandó Konferencia 2022 - Absztrakt kötet, 2022, pp. 46–46.
- [19] K. Gergely, J. V. Péter, W. Tibor, W. Dóra, G. Sándor, N. László, and K. Róbert, “ ‘Opened’ or ‘Closed’ RAN in 5G”, in IEEE 20th Jubilee World Symposium on Applied Machine Intelligence and Informatics SAMI (2022), 2022, pp. 347–351.

Aspects of Selection for RF Band Direction Finding Techniques

Robert Sandor Kovacs

Obuda University, Kando Kalman Faculty of Electrical Engineering, Tavaszmező utca 15-17., 1087 Budapest, Hungary, kovacs.robert@kvk.uni-obuda.hu

Abstract: One of the most important elements of monitoring 21st-century radio communication technologies is determining the direction of transmission of sources and, in more specific cases, their exact geographical location, which is based on direction-finding capabilities. Direction finding in the RF (radio frequency) range plays a critical role in several technical and security applications, including monitoring communication systems, detecting interference sources, electronic warfare, and civil and military navigation. With the spread of mobile networks, the development of drone technology, and the deployment of smart city infrastructures, there is a growing demand for fast, reliable, and accurate direction-finding solutions. While prizing radio direction finding (RDF) for navigation alone is declining due to the spread of satellite positioning systems (GPS), there is a growing demand for accurate positioning of individual communication devices in both civilian and military applications. Radio direction finding, carried out under the guidelines of the International Telecommunication Union (ITU), has an impact not only on interference source identification and the detection of unauthorized transmitters, but also on scientific research areas such as radio astronomy and remote sensing. In telecommunications, spatial multiplexing (SDMA) in communication networks using modern wireless multiple-antenna (MIMO) systems also requires the precise direction of incoming radio waves to be determined. In military applications, such as signals intelligence (SIGINT) and electronic support measures (ESM), determining the line of beam (LOB) of electromagnetic radiation is essential for mapping the enemy's battle order (EOB) and establishing information superiority. [1] [1] The technical principles behind the various direction-finding methods differ depending on the type of information used: this can be the phase, amplitude, arrival time, or a combination of these factors. The technology always tailors to the specific application environment, considering factors such as accuracy, response time, system configuration size, cost, and even field applicability. This article provides a comparative overview of the most widely used direction-finding methods in the RF range, including their operating principles, advantages and disadvantages, and practical applications. The text also aims to comprehensively describe how to determine the spatial direction of a radio signal source using various engineering approaches and the criteria users should consider when selecting a method for a specific task.

Keywords: radio direction finding, phase measurement, amplitude-based DF, TDOA, MUSIC, ESPRIT, interferometry, electronic detection

1 Introduction

Direction finding (DF), the process of estimating the direction or bearing of electromagnetic wave propagation, is one of the fundamental capabilities of modern radio frequency (RF) systems. From the earliest radio communication systems to today's complex, software-defined and intelligent networks, DF has played an indispensable role in signal intelligence, spectrum management, and wireless infrastructure optimization.

In essence, DF aims to determine the Direction of Arrival (DOA) of an electromagnetic signal at one or more receiving antennas. This information is critical in various applications: locating emitters in electronic warfare (ELINT), detecting interference in cellular networks, supporting navigation and SAR search-and-rescue operations, and optimizing the performance of multi-antenna communication systems. As wireless technologies evolve towards higher frequencies and broader bandwidths — from HF and VHF systems up to millimetre-wave and satellite bands — the accuracy, speed, and robustness of direction finding have become increasingly important. [1]

Historically, DF techniques date back to the early 20th century, when mechanical goniometers and rotating antennas were used for naval and aviation navigation. Early systems relied on comparing received signal amplitudes across directional antennas to infer the bearing of a transmitter. While effective, these analogue systems were limited by low resolution, mechanical complexity, and slow response times. The introduction of phase-measuring interferometers in the mid-20th century significantly improved precision, paving the way for electronic direction finding (E-DF) systems capable of sub-degree accuracy without moving parts.

In contemporary RF environments, signals are often wideband, intermittent, and affected by multipath propagation, where reflections and scattering cause multiple signal components to arrive at slightly different angles and times. These conditions challenge traditional DF systems, which assume ideal, line-of-sight propagation. To address this, modern DF systems employ digital signal processing (DSP), array calibration, and super-resolution algorithms such as MUSIC (Multiple Signal Classification), ESPRIT (Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance Techniques), and Capon or MVDR (Minimum Variance Distortionless Response) beamformers. These techniques exploit the statistical structure of the received signal covariance matrix to achieve angular resolutions far beyond classical beamforming limits. [2]

Moreover, the rise of massive MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) systems, radar sensor networks, and RF situational awareness platforms has transformed DF from a specialized military tool into a core enabler of modern wireless engineering. In 5G and 6G communications, for instance, DOA estimation is integral to beamforming, spatial multiplexing, and localization. The synergy

among DF, localization and adaptive beam control results in significant improvements in spectral efficiency and interference management.

In recent years, the integration of machine learning (ML) and artificial intelligence (AI) has further advanced DF technology. Hybrid model-based and data-driven approaches combine the interpretability of physical array models with the robustness of learning systems that can adapt to calibration errors, hardware imperfections, or non-ideal propagation conditions. These trends mark a paradigm shift — from purely analytical estimation methods to adaptive, intelligent RF sensing systems. (Figure 1)

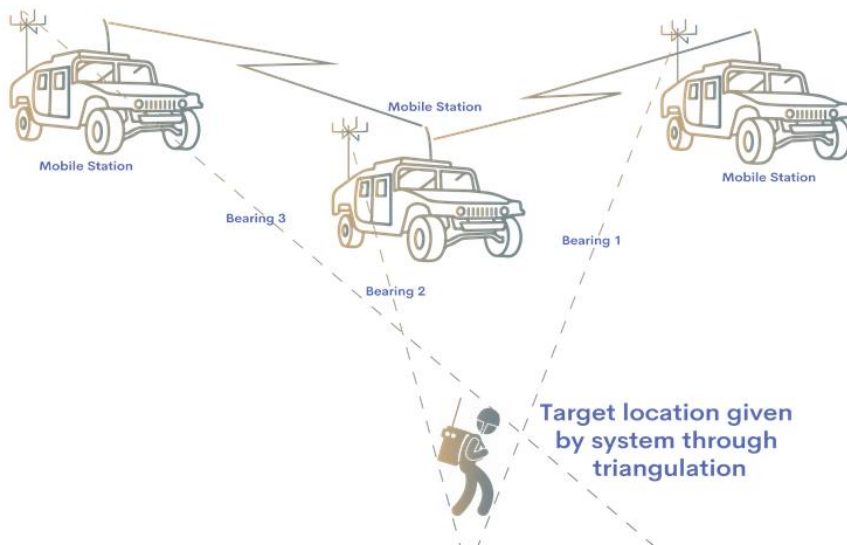


Figure 1 Principle of radio direction finding

Source: <https://www.stratign.com/direction-finding-system/> (Accessed: 19.11.2025)

Consequently, direction finding remains a vibrant and evolving field that bridges classical electromagnetics, array signal processing, and artificial intelligence. The following sections of this paper provide a structured overview of the primary DF methodologies — amplitude-based, phase-based, and time-based (TDOA) — followed by an examination of super-resolution and learning-enhanced algorithms, practical implementations, and current research directions. [3]

2 Requirements

The requirements for radio direction finding methods can be grouped according to several criteria. One possible way is to organize the categories using the most general criteria as a system. [4], [5] (Figure 2)

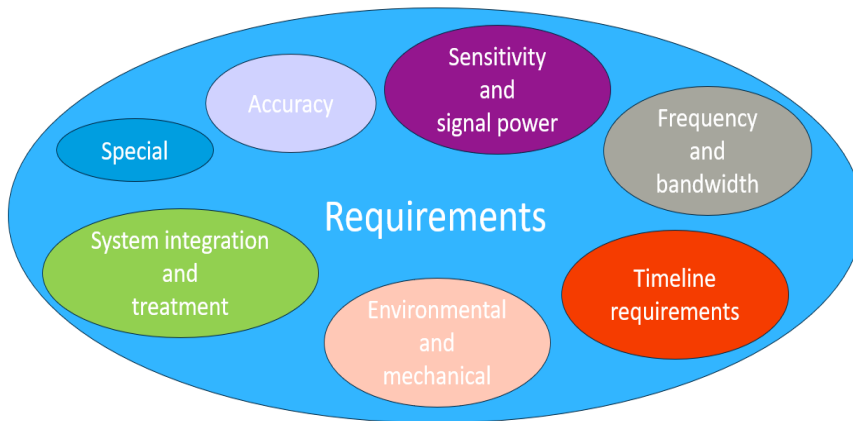


Figure 2
Requirements for radio direction finding methods
Source: Edited by the author

Accuracy requirements

In terms of accuracy requirements, the most important characteristic is the direction-finding system's direction-determination accuracy. The direction finder must determine the proper incoming direction with a slight angular deviation (typically $\pm 1-3^\circ$ e.g. in aviation applications; however, there are areas of use where significantly stricter requirements must be imposed (e.g. $\pm 0.5^\circ$ in military systems). In terms of stability, the measurement accuracy does not deteriorate with changes in environmental conditions, frequency, or signal level. Another requirement is the ability to be calibrated, which means the system must ensure error compensation (e.g., antenna phase deviation, multipath effects).

Sensitivity and signal power

The minimum input signal level determines the receiver sensitivity. In addition, it is expected that the receiver will still be able to determine direction even at low signal levels. The direction finder needs to provide this reliably, even at low signal-to-noise ratio (SNR). At the same time, it is required that the system handle both weak and strong signals without distorting the sensitivity parameters, i.e., it should have an adequate dynamic range.

Frequency and bandwidth

The operating frequency range defines the frequency band or bands for which the system is designated (e.g., 100 kHz to 3 GHz, depending on the application). The receiver's operating bandwidth must match the type of source signal (e.g., AM, FM, or digital modulation). Modern radio direction-finding systems can perform parallel direction finding across multiple frequencies through multi-channel operation.

Time requirements

Increasing the measurement speed allows you to determine the direction quickly (in the order of ms–s). In multi-station (networked) systems, accurate time synchronization is required for location determination (e.g. in the TDOA method), which is determined by the time synchronization capability.

Environmental and mechanical requirements

Operating temperature range. In terms of environmental protection, the device must operate reliably over a range of -40 °C to +60 °C, which can be wider in some cases, such as military applications. Its mechanical resistance should be vibration-, shock-, and weather-resistant (mobile or field systems). It is also important that the direction-finding system does not interfere with or be sensitive to interference from other systems, in terms of Electromagnetic Compatibility (EMC).

System integration and management requirements

Automatic direction finders require as little operator intervention as possible, and their measurement results are transmitted via a network to a central processing unit (Data communication). The User Interface must have a clearly understandable display, direction, signal strength, and time stamp display capability. In addition to all this, maintainability can be ensured through the modular structure and the ability to perform remote diagnostics.

Special requirements

There are other application-dependent Gyed expectations, such as:

Air/aviation application: Compliance with ICAO and EASA regulations (e.g. VDF systems).

Military applications: interference protection, hidden operation, encrypted data transmission.

Civil telecommunications/shipping: compliance with international standards (ITU, IMO)

Application environment: fixed, mobile, land/airborn

3 Radio direction finding methods

Direction Finding (DF) is the set of procedures used to determine the direction of radio signals. Its purpose is to identify the direction and position of the radiating transmitter (source).

Application areas:

- navigation
- reconnaissance
- radiolocation
- interference control

3.1 Amplitude-based direction finding

The antenna's directional characteristics cause the amplitude of the incoming signal to vary with the direction of radiation. Rotating antenna systems mechanically rotate the antenna to find the maximum signal strength, which indicates the direction. The Adcock system measures the differential voltage between two vertically polarised antennas, reducing the effects of horizontal noise. The advantages of the method are simple construction, low power consumption, and low implementation cost. However, it is associated with limited accuracy (3–10°), slow response time, and high sensitivity to multipath propagation. [6], [7](Figure 3)

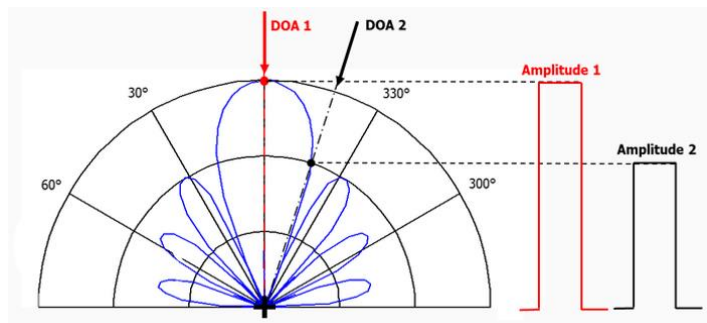


Figure 3

Amplitude-based direction finding principle with directional antenna characteristic weighting.

Source: <https://www.emsopedia.org/entries/passive-direction-finding-df-techniques-amplitude-comparison/> (Accessed: 19.11.2025)

3.2 Phase-based direction finding

Phase-interferometric systems can determine direction from the phase difference measured between two or more antennas. The following relationship exists between the $\Delta\varphi$ phase difference and the θ angle of incidence:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot d \cdot \sin(\theta) \quad (1)$$

where d is the distance between the antennas, and λ is the wavelength.

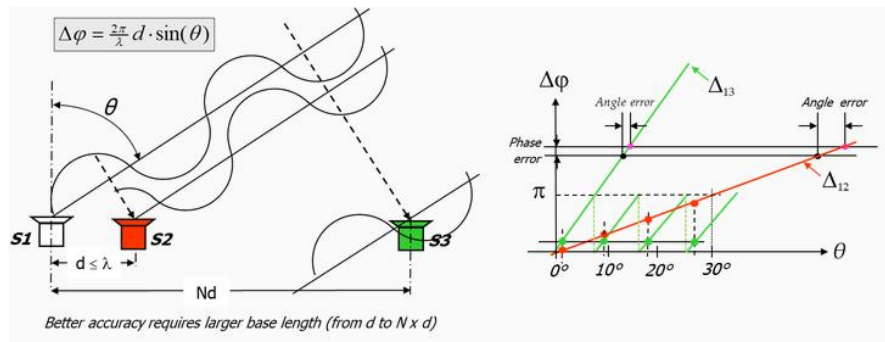


Figure 4

Phase comparison technique concept

Source: <https://www.emsopedia.org/entries/passive-direction-finding-df-techniques-phase-comparison/> (Accessed:19.11.2025)

The advantage of this method is its high accuracy and fast response time, but the disadvantages are complicated calibration and expensive electronics. It is the most widely used technique in military and civilian applications (such as flight navigation or spectrum reconnaissance). [8], [9]

3.3 Time difference-of-arrival (TDOA) direction finding

The TDOA¹⁴Radio direction finding is a radio engineering procedure that determines the position of a transmitter by measuring the differences in the arrival times of the signal at several remote receiving stations. The signal emitted by a radio transmitter at an unknown location is detected by several receiving stations at known positions at a given time, and the receivers compare the signal's arrival times. Hyperbolas can be written from the differences (Δt), the intersection of which gives the position of the transmitter.

¹⁴TDOA: Time Difference of Arrival

If the signal arrives between two receivers with a time difference Δt , then the location of the transmitter can be at points where the distance difference is constant:

$$|S_1 - S_2| = c \cdot \Delta \text{TOA} \quad (2)$$

where S_1 and S_2 are the distances of the transmitter from each station, B is the distance of the receiving antennas and c is the speed of light ($\approx 3 \cdot 10^8$ m/s). (Figure 5)

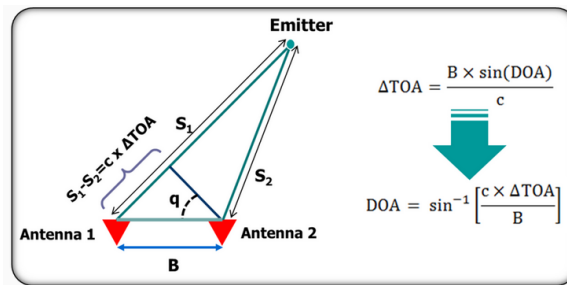


Figure 5

TDOA comparison technique concept

Source: <https://www.emsopedia.org/entries/passive-direction-finding-df-techniques-dtoa-difference-time-of-arrival-comparison/> (Accessed: 19.11.2025)

For a given $|S_1 - S_2|$ distance difference, the set of geometric locations that could be potential radiation sources can be plotted. (Figure 6)

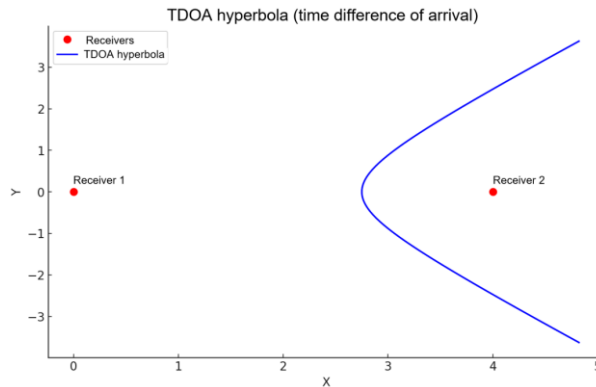


Figure 6

Possible TDOA hyperbola locations in case of two receivers

Source: Edited by the author

In the case of two direction-finding receivers in two dimensions, this results in an infinite number of solutions along a hyperbolic curve; therefore, for accurate 2D/3D positioning, at least three direction-finding receivers with known positions must be used simultaneously. With appropriate time synchronization and a

network, the passive TDAO method can achieve high accuracy. The disadvantage is that exact time measurement is required on the receiver side (e.g., GPS time), and multipath propagation (reflections) can cause errors in the measurement. [10], [11]

The widespread direction finding method is used in many areas, such as:

- mobile phone network location
- military radio reconnaissance, electronic warfare
- measuring drones and radar-protected devices
- aviation and maritime navigation systems
- search and rescue services (e.g. missing beacons)

3.4 Digital/hybrid methods

Technical breakthroughs in digital signal processing fundamentally drive the development of modern radio direction-finding systems. While classical amplitude and phase measurement methods rely on analogue principles, modern systems generate the necessary direction information from digitally sampled, spatially correlated antenna-array signals. The essence of digital/hybrid direction-finding methods is that the statistical properties of the measured radio-frequency signals — such as their covariance matrix — are analyzed using mathematical models, from which the direction of the incoming wavefront can be determined with high accuracy. [12]

The best known Super Resolution DOA algorithms are MUSIC (Multiple Signal Classification) and ESPRIT (Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance). The MUSIC technique determines the possible directions of arrival by spectral resolution of the signal and noise spaces, thereby distinguishing between multiple radiation sources close to each other. Its disadvantage is that it is computationally intensive, thus requiring high processing capacity. The ESPRIT technique achieves the same goal by using mathematical matrix invariance, which is why it is faster while also operating robustly in multipath environments — thus it is often used in military and urban radio reconnaissance, passive radars, and base station sector inspection of 5G/6G networks. [13] (Figure 7)

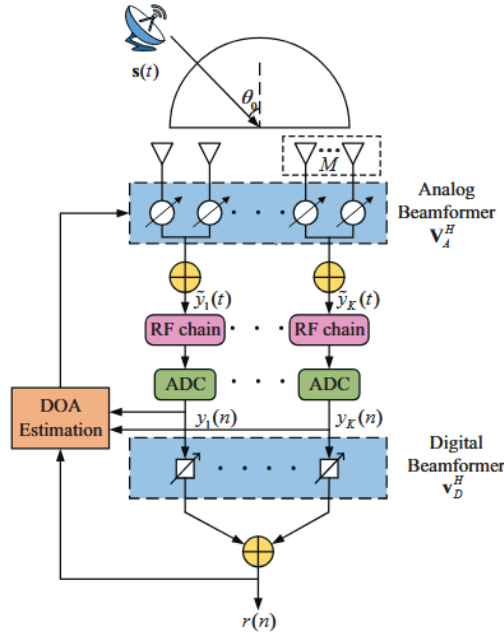


Figure 7

ULA hybrid beamforming sub-connected architecture

Source: <https://arxiv.org/pdf/1712.02085> (Accessed:19.11.2025)

ML/AI-based hybrid DF systems have also emerged, combining physical antenna models with machine learning. Deep neural networks (DNNs), convolutional networks (CNNs), or autoencoders can learn antenna-array errors, distortions, and urban multipath propagation, thereby providing more accurate results than classical algorithms in many cases. They are mainly used for mobile network location, drone reconnaissance, electronic warfare (EW/ESM) systems and RF spectrum surveillance. [14]

4 Summary

Radio direction-finding methods offer different levels of accuracy, response time, and system complexity, so their selection is always application-dependent. Classical amplitude-based techniques are a simple and cost-effective solution, but their accuracy is limited ($3\text{--}10^\circ$), especially in noisy or multipath environments. Phase-based interferometric systems are significantly more accurate ($0.5\text{--}2^\circ$) and fast, and therefore play a prominent role in military, jamming control and civil navigation applications, although they require calibration. (Table 1)

Table 1

Radio direction finding methods
Source: Edited by the author

Method type	Theoretical basis	Accuracy (°)	Reaction time	Technical complexity	Multipath sensitivity	Typical application	Preference	Disadvantage
Amplitude-based	Field strength difference	3–10	Slow	Low	High	Navigation, education	Simple, cheap	Inaccurate, noise sensitive
Phase-based	Phase difference	0.5–2	Fast	Medium–high	Medium	Military DF, jamming control	High accuracy	Calibration-intensive
TDOA	Time difference	1–5 (in position: <100 m)	Medium	Large	Medium	Broadband positioning	Great coverage	Time synchronization required
MUSIC/ESPRIT (digital)	Spatial correlation	<0.5	Very fast	Very high	Low	Modern radar, passive reconnaissance	Multiple source handling, noise tolerance	Costly, computationally intensive

TDOA methods are primarily used for large-area, broadband location determination. Their advantage is that they are also suitable for position determination, but their disadvantage is the need for precise time synchronization. Modern digital, super-resolution methods (e.g., MUSIC, ESPRIT) achieve accuracies of even less than 0.5° , with separation of multiple simultaneous sources and good multipath tolerance, but they require substantial computing and equipment.

Overall, the comparison of methods (Table 1) shows that future direction-finding systems are based on a combination of analogue and digital solutions, as well as on procedures supported by high-precision, broadband, and intelligent data processing.

Conclusions

The development of radio direction-finding methods has reached a new level today, where digital, multi-antenna, and intelligent signal analysis solutions are gradually taking over the role of classic analogue and mechanical systems. The requirements of the modern RF environment — such as broadband signal handling, real-time evaluation, compensation for multipath propagation errors, and increasingly smaller systems integrated into mobile platforms — create challenges that traditional amplitude, phase, or TDOA technologies alone can no longer fully address. Advanced stochastic and super-resolution algorithms (MUSIC, ESPRIT,

Capon/MVDR) as well as newly emerging artificial intelligence-supported hybrid solutions enable direction-finding accuracy to reach or exceed the tenth-degree range, while identifying multiple simultaneous emitters even in noisy, reflected environments.

The integration of artificial intelligence is an auspicious direction. Using data-driven models, not only can multipath effects be reduced, but calibration errors, antenna geometry distortions and channel changes can also be compensated for. This makes radio direction finding not just an instrumentation task but a complex, networked information-processing and decision-support system. Application areas such as spectrum reconnaissance, drone direction detection, smart city device localization, and 5G/6G MIMO-based beamforming and localization are given a prominent role in the development.

Overall, the future of radio direction finding lies in the integrated application of analogue and digital methods, the adaptive operation of intelligent algorithms, and network-based, cooperative, and broadband systems. The most important design considerations remain accuracy, robustness, time synchronisation, multi-source handling, and data processing capacity. Direction-finding systems of the future will not only detect radio presence but also support intelligent interpretation of activities in the communication space.

References

- [1] Rohde und Schwarz, Introduction to Theory of Direction Finding, 2011/12., Source: <https://cdn.everythingrf.com/live/direction-finding-rs-wp-erf.pdf> (Accessed: 09.10.2025.)
- [2] Jiangzou Wang et al., DOA Estimation Using Massive Receive MIMO: Basic Principle and Key Techniques, Source: <https://arxiv.org/abs/2109.00154> (Accessed: 31.10.2025.)
- [3] A. A. Salama, Direction of Arrival Estimation: A Tutorial Survey of Classical and Modern Methods, Source: <https://arxiv.org/pdf/2508.11675>. (Accessed: 20.11.2025.)
- [4] Y. Liu, S. Li, H. Zhang et al., DOA Estimation for Massive MIMO Systems with Unknown Number of Sources and Low SNR, Sensors, vol. 22(22), 2022., Source: <https://www.mdpi.com/1424-8220/22/22/8634> (Accessed: 20.11.2025.)
- [5] H. Almosa, S. Mosleh, E. Perrins & L. Liu, Performance Analysis of DoA Estimation for FDD Cell Free Massive MIMO, Journal of Communications, vol. 18, no. 10, Oct. 2023. Source: <https://eprints.whiterose.ac.uk/id/eprint/207270/1/JCM-V18N10-6> (Accessed: 20.11.2025.)

- [6] EMSOPEDIA, Passive Direction Finding [DF] Techniques – Amplitude Comparison, Source: <https://www.emsopedia.org/entries/passive-direction-finding-df-techniques-amplitude-comparison/> (Accessed: 20.11.2025.)
- [7] Design of Wideband Radio Direction Finder Based On Amplitude Comparison, ResearchGate, 2011. Source: https://www.researchgate.net/publication/358368280_Design_of_Wideband_Radio_Direction_Finder_Based_On_Amplitude_Comparison . (Accessed: 20.11.2025.)
- [8] Y. Zhang, Wideband and Wide-Scan Gap Waveguide Antenna Array ..., Chalmers Publication, 2017. Source: https://research.chalmers.se/publication/539781/file/539781_Fulltext.pdf (Accessed: 20.11.2025.)
- [9] M. Rosenblum et al., Real-time estimation of phase and amplitude with ..., Scientific Reports, 2021. Source: <https://www.nature.com/articles/s41598-021-97560-5> (Accessed: 20.11.2025.)
- [10] F. Wen et al., A Survey on 5G Massive MIMO Localization, Chalmers Publication, 2023. Source: https://research.chalmers.se/publication/511660/file/511660_Fulltext.pdf (Accessed: 20.11.2025.)
- [11] PDFT–DTOA Comparison, Source: <https://www.emsopedia.org/entries/passive-direction-finding-df-techniques-dtoa-difference-time-of-arrival-comparison/> (Accessed: 20.11.2025.)
- [12] J. Wang et al., DOA Estimation Using Massive Receive MIMO: Basic Principles, Key Techniques..., 2021. Source: <https://arxiv.org/pdf/2109.00154> (Accessed: 20.11.2025.)
- [13] Y. Li, B. Shi, F. Shu et al., Deep Learning Based DOA Estimation for Hybrid Massive MIMO Receive Array with Overlapped Subarrays, arXiv preprint arXiv:2209.04806, 2022. Source: <https://arxiv.org/abs/2209.04806>. (Accessed: 20.11.2025.)
- [14] A. A. Salama, Direction of Arrival Estimation: A Tutorial Survey..., arXiv, 2025. Source: <https://arxiv.org/pdf/2508.11675> (Accessed: 20.11.2025.)

Ízületi stabilizáló rendszer fejlesztése

Kondorosi Gréta¹, Molnár Zsolt²

¹ független kutató, Szeged

² Óbudai Egyetem, Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar, Budapest

Absztrakt: A váll elülső instabilitása mindennapos problémát jelent sokak számára, amely olyan egyszerű mozdulatok esetén is vállficammal fenyegethet, mint a hátra nyúlás vagy egy labda elhajítása. A váll stabilizálásának több módja is van, amelyek közül a leginkább elterjedt a kompressziós vállpántok használata. Ezen vállpántok jelentős hátránya azonban, hogy viselésük hosszú távon izomgyengülést okoz, ami a váll instabilitását tovább növelheti. A diplomadolgozatomban kereteim belül megvalósított kutatásunk során egy olyan segédeszközt fejlesztettünk ki, amely aktívan viselhető a hétköznapiak során, és nem gyakorol felesleges kompressziót a vállra. Csak akkor fejt ki erőt, amikor a kar vállficamot előidéző tartáshoz közelít. Újdonság, hogy mindezt egy olyan elrendezéssel valósítottuk meg, amely a nitinol, mint alakemlékező ötvözetet használja fel aktuátorként. A megoldás jelentős energiát takarít meg, valamint növeli a komfortérzetet a pneumatikusan vagy hidraulikusan működtetett stabilizátor rendszerekhez képest. A kiválasztott aktuátor, a nitinol fizikai és termoelektromos tulajdonságainak alapos elemzése alapján terveztük meg a prototípust, amelynél figyelembe vettünk egy kisebb csoporton végzett felmérés alapján az általános vállfelület-méretet, valamint az ebből adódó szükséges erőt, amely képes a megfelelő kartartás pozicionálásához. A kartartás-érzékeléshez és a huzalok működtetéséhez először hardvert, majd vezérlőszoftvert fejlesztettünk. Az így összeállított segédeszközt végül komplex tesztnak vetettük alá.

Kulcsszavak: nitinol; elülső váll-diszlokáció; emlékezőfém

1 A váll instabilitása és gyógy módjai

A vállízület sajátos anatómiájából eredően az emberi test leggyakrabban elmozduló ízülete. Egy-egy rossz mozdulat vagy esés folyamán könnyen bekövetkezik a vállficam, amely minél többször fordul elő, annál inkább növeli a váll instabilitásának veszélyét, ami az inferior glenohumeral ínszalag gyengülésének tudható be, ugyanis ezen ínszalag akadályozza meg az ízület elülső irányba történő elmozdulását. [1] [2] [3] Ennek megfelelően a válldiszlokáció 95-97%-ban elülső irányba történik, leggyakrabban a kar hátra forgatott, kinyújtott állapotában, vagy eséskor kitámasztott kar esetén jelentkezhet. [4] Kiújulási

kockázata 20 éves kor alatt akár 95% is lehet, míg 30 éves kor feletti aktív sportolóknál 82%-ot, a nem sportolóknál 27%-ot érhet el. [5]

Kritikus esetekben műtéti beavatkozás szükséges a váll stabilizáláshoz. A műtétet követő immobilizációs időszak azonban a stabilizációért felelős izmok egy részének gyengülését, továbbá súlyos esetben sorvadását vonja maga után. [6] Ezen felül az immobilizált váll funkciócsökkenése is bekövetkezik, amelynek megelőzésére különböző fizioterápiák javasoltak, így erősíthető lehet a váll anélkül, hogy az elülső ficam esetén érintett ínszalagok terhelésnek legyenek kitéve. [7]

Kevésbé kritikus esetekben elegendőnek bizonyulhat a különböző vállpántok használata, amelyek megkülönböztethetők két nagy csoport szerint. Az egyiket a korábban is említett immobilizációs pántok, míg a másikat a kompressziós pántok alkotják, amelyek ellentétben az immobilizációs pántokkal nem egy megadott pozícióban rögzítik a kart, csupán egy bizonyos mozgástartományban korlátozzák a felhasználót. Többnyire az abdukciót és a külső rotációt gátolják (például egy dobómozdulatot), így megelőzhetővé téve a váll elülső diszlokációját. Használatuk igen elterjedt a sportolók és aktív életet élők körében. [9] Azonban hiába a részleges mozgásszabadság, a vállpántok által kifejtett folyamatos kompresszió hosszú távon szintén az izomzat és közvetetten az ínszalagok gyengülését okozza, amelyek növelik a váll instabilitásának kockázatát. Ezen felül nem képesek dinamikusan lekövetni a váll mozgását.

A diplomadolgozat keretein belül kifejlesztett segédeszközzel a cél egy olyan megoldás kialakítása volt, amely képes dinamikusan alkalmazkodni a viselőjéhez és szemben a kereskedelmi forgalomban kapható vállpántokkal, csak akkor fejt ki a felhasználójára erőt, amikor elülső diszlokációt előidéző kartartást érzékel. Ezen megoldás segítséget nyújthat akár a rehabilitációs fizioterápia, vagy gyógytorna elvégzése közben is, hiszen az otthon, gyógytornász felügyelete nélkül végzett gyakorlatok káros hatással lehetnek. A folyamatos kartartásfigyelés és az ennek hatására létrejövő felhasználó figyelmeztetés növelheti a torna hatékonyságát.

2 Az aktuátor kiválasztása

A vállpánt dinamikus viselkedésének létrehozására egy olyan aktuátorra volt szükség, amely vezérelhető és képes akkora erőt kifejteni a vállra, amely értesíti a felhasználót a helytelen kartartásról. Ehhez többféle lehetséges kialakítás került górcső alá.

A gyógyászatban igen elterjedtek a pneumatikus műizmok (PMI – Pneumatic Artificial Muscles), amelyek rugalmas szövetből készült tömlők vagy membránok. Alakjukat belső nyomás változására képesek módosítani, ezáltal erőkifejtést létrehozva. Már a 20. században megjelentek a McKibben-féle pneumatikus

műizmok formájában, amelyeket paralízisben szenvedők rehabilitációjához alkalmaztak, de találkozhatunk még velük a robotikában is, megfogó szerkezetek formájában. [10] Előnyük a kis tömeg, a rugalmas működés, valamint a hajlékonyság. [11] Hátrányuk közé sorolható, hogy a működtetésükhöz szükséges túlnyomás előállítása a hordozhatóságukat nagyban megnehezíti. A nyomásszabályzás, valamint a levegő összenyomhatóságából adódó pontatlanság tovább nehezíti alkalmazhatóságukat, így a pneumatikus aktuátorok jelen feladat ellátására nem alkalmasak.

A pneumatikus mesterséges izmok családjához igen közel állnak a hidraulikus műizmok, amelyek szintén egy rugalmas membrán alappal rendelkeznek, amibe folyadékot vezetve megvalósítható az erő kifejtés. A robotika területén ugyancsak elterjedtek, de megtalálhatóak exoszkeletonok működtető elemeinél is. A pneumatikus elven működő műizmoknál pontosabban szabályozhatóak a folyadékok összenyomhatatlanságából adódóan, azonban ez jelentős többletsúlyt okoz. Egy folyadékkal telt tartály, valamint a nyomásépítéshez szükséges berendezések szintén nem engedik meg a készülék kompaktságát. Mindezekon felül a szivárgó közeg további számos nem kívánt problémát okozhat a felhasználó számára. [12]

A mesterséges izmok legújabb típusai az elektroaktív polimerek (EAP – Electroactive Polymers), amelyek működése a biológiai izmokéhoz hasonló. Az elektromos tér hatására a polimerek szerkezete megváltozik, ezáltal mechanikai deformációt hozva létre. Két fő típusuk az elektrosztatikus és az ionos EAP. Nagy deformálhatóságuk és lágyáguk miatt ígéretesek, elsősorban érzékelőkben, aktuátorokban és robotikai területen használatosak. Azonban az általuk kifejtendő erő és az anyagok hosszú távú stabilitása ma még nem teszi lehetővé gyakorlati alkalmazásukat, így nem alkalmas egy ízületi stabilizáló rendszer aktuátori feladatainak ellátására. [13]

A harmadik megvizsgált csoportot az alakemlékező ötvözetek (SMA – Shape Memory Alloys) alkotják, amelyek sajátos kristályszerkezetüknek köszönhetően az átalakulási hőmérsékletük elérését követően hő hatására visszanyerik eredeti alakjukat, lehűlt állapotukban pedig szabadon deformálhatók. Leggyakoribb típusaik a réz–alumínium–nikkel és a nikkel–titan (nitinol) ötvözetek. [14] Alacsony hőmérsékleten rugalmasan alakíthatóak, míg melegítés hatására merev szerkezetűvé válnak. [15] Kiváló teljesítmény-tömeg arányuk miatt széles körben alkalmazhatóak, például nitinol implantátumok formájában a szív- és érrendszeri gyógyászatban, illetve kézi exoszkeletonokban. [16] [17] Ezen pozitív tulajdonságainak köszönhetően a választás a nitinolra esett, mint erő kifejtésre használandó aktuátor, ugyanis formája hőkezeléssel igény szerint alakítható a váll sajátos alakjához, méretéhez képest nagy erő kifejtésére képes, illetve működtetéséhez nincs szükség bonyolult berendezésekre, elegendő egy egyszerű elektromos áramforrás.

3 Nitinol bemutatása

A nitinol egy nikkel–titan alapú alakemlékező ötvözet, amely közel egyenlő arányban tartalmazza két fő alkotóelemét. Ezek pontos összetétele gyártónként eltérhet. [18] Nevét az összetevőkből (Ni–Ti) és a Naval Ordnance Laboratory-ról kapta, ahol 1960-ban került először előállításra, noha a felfedezése már 1932-ben megtörtént. [18] A kereskedelemben többféle kivitelben is megtalálható, mint például huzal, cső, lemez, fólia és rugó formájában.

A nitinol alakmemóriáját a kristályszerkezet hőmérsékletfüggő változásának köszönheti: alacsony hőmérsékleten martenzites, magasabb hőmérsékleten ausztenites fázisban található. A fázisátalakulás azonban nem egyetlen pontban, hanem egy hőmérsékleti tartományban megy végbe, amelyet az ötvözet összetétele és hőkezelése határoz meg. A melegítés és hűtés során eltérő hőmérsékletek jellemzők. Réz hozzáadásával ez a hiszterézis csökkenthető, és az átalakulási hőmérséklet pontosabban beállítható, ami az orvosi alkalmazásoknál különösen előnyös. [19]

A hő- és mechanikai megmunkálás szintén befolyásolja a fázisátalakulást: a hidegmunkálás növeli a szilárdságot, de csökkenti az alakmemóriát, míg a hőkezelés ennek ellenkezőjét eredményezi. A legtöbb nitinol egyirányú memóriaeffektussal rendelkezik (melegítéskor visszanyeri eredeti formáját), de megfelelő kezeléssel kétirányú hatás is elérhető. Az anyag szuperelasztikus tulajdonsága révén bizonyos deformáció után hőmérséklet-változás nélkül is képes visszanyerni alakját. [19]

Azonban a fellelhető irodalom szerint formaemlékező tulajdonsága az eddigiekben csak kisebb erő kifejtésre volt használatos. Egy olyan műkezet hoztak létre, ami képes néhány alapvető fogási és markolási mozdulat megvalósítására. [17] Az eddigiekben igen kevés tanulmány készült a nitinol nagyobb súlyokkal történő terhelésére. Illetve ami fel is lelhető, annak tartalmát méréseinkkel cáfoltuk, így igazságtartalma megkérdőjelezhető. [20]

A fejlesztendő készülékhez első lépésként elengedhetetlen a nitinol fizikai tulajdonságainak feltérképezése ismétlődő igénybevétel esetén, valamint a megfelelő huzalátmérő és edzéssel kialakított forma megválasztása. A következőkben az ötvözet pontosabb megismeréséhez végzett tesztek kerülnek bemutatásra.

4 Nitinollal végzett mérések

A tesztek alapját az egyetlen európai kereskedőtől, a Smart Wires-től vásárolt nitinol huzalok adták. A mérések kezdetben különböző átmérőjű huzalokkal készültek, majd a megfelelő huzalátmérő kiválasztását követően alapos vizsgálat alá került az anyag, ismétlődő terheléses tesztek segítségével.

4.1 Rugós kialakítás és Flexinol tesztelése

Kezdetben 0,15 mm és 0,25 mm átmérőjű Flexinol huzalok kerültek tesztelésre, a gyártó által nyújtott adatlap ígéretes információi miatt, amelynek fő értékeit az 1. táblázat tartalmazza.

1. táblázat: A Flexinol nyártói információi (forrás: [21])

Huzalszál átmérője	0,15 mm	0,25 mm
Huzal típusa	Flexinol	Flexinol
Minimum hajlítási sugár	7,5 mm	12,5 mm
A formára hajlításhoz szükséges csavar mérete	M16	M27
Átalakulási hőmérséklet	70°C	70°C
Irodalmi áramszükséglet	0,4 A	1 A
Irodalmi megemelhető tömeg	330 g	930 g

Az alapvetően egyenes huzalok először rugó formára lettek edzve, hogy érvényesülni tudjon a memóriaeffektus, amely tulajdonságot nagyban lehetne kamatoztatni, ugyanis átalakulási hőmérséklete alatt a rugó szabadon nyújtható, azonban áramot vezetve a huzalra, az összehúzódik és erőt fejt ki. Az edzéshez egy csavarmenetre lettek szorítva a huzalok külön-külön. Ezt követően 5 percen át lettek kezelve hőlégfúvóval kb. 500°C-os, 450 l/min mennyiségű levegővel, majd szobahőmérsékletű vízbe mártva visszahűtésre kerültek. Az így kialakított rugók egyik vége állványra lett rögzítve, míg a másik, szabadon álló végükre egy-egy mérőpohár lett rögzítve, amelybe különböző súlyok rakhatóak igény szerint. A rugók végeire egy egyenáramú laboratóriumi tápegység pozitív és negatív polaritásai lettek kapcsolva, majd a kinyújtott rugókra 3,4 VDC feszültség került, kb. 0,4 A és 0,5 A közötti áramerősséggel külön-külön. A tapasztaltak szerint mindkét átmérőjű huzal képes volt az összehúzódásra a mérőpohár pár grammos tömegével, azonban, ha a pohár már terhelve volt, a huzalok nem tudtak összehúzni. A teszt alapján megkérdőjelezhetők a gyártó általi adatok. Kijelenthető, hogy a Flexinol erő kifejtésre nem alkalmas. Ezen felül a rugós kialakítás a huzal

minimális hajlítási sugarának figyelembevételével túl nagy helyet foglalna, így nem lenne beilleszthető egy mindennaposan hordható segédeszközbe, így a huzal edzési formája szintén átalakítást igényel.

4.2 Hullámforma kialakítás és nitinol tesztelése

A Flexinol elhagyásával a hagyományos nitinollal folytak tovább a mérések. Szintén a Smart Wires-től kerültek megrendelésre 0,5 mm, 1 mm, illetve 2 mm huzalátmérőben. A rugós kialakítást helytakarékosági szempontokból kétdimenziós alakra cseréltük, egyfajta hullámformát kialakítva, hiszen ennél a formánál is életbe lép az átalakulási hőmérséklet alatti könnyed deformálhatóság majd az aktivált memóriaeffektus okozta összehúzódás általi erő kifejtés. Az edzés egy erre a célra kialakított kereten történt hőlégfúvó segítségével a korábbiakhoz hasonló módon, amelyet az 1. ábra mutat be. A tesztek a korábban ismertetett állvány és mérőpohár segítségével történtek.



10. ábra: Hullámformára történő edzés

4.2.1 1 mm átmérőjű huzal egyszeri tömegek emelések esetén

A teszt során 1 mm átmérőjű nitinol huzal paramétereit vizsgáltuk különböző megemelt tömegek esetén, amelynek eredményeit a 2. táblázat szemlélteti.

2. táblázat: 1 mm átmérőjű nitinol huzal terhelése

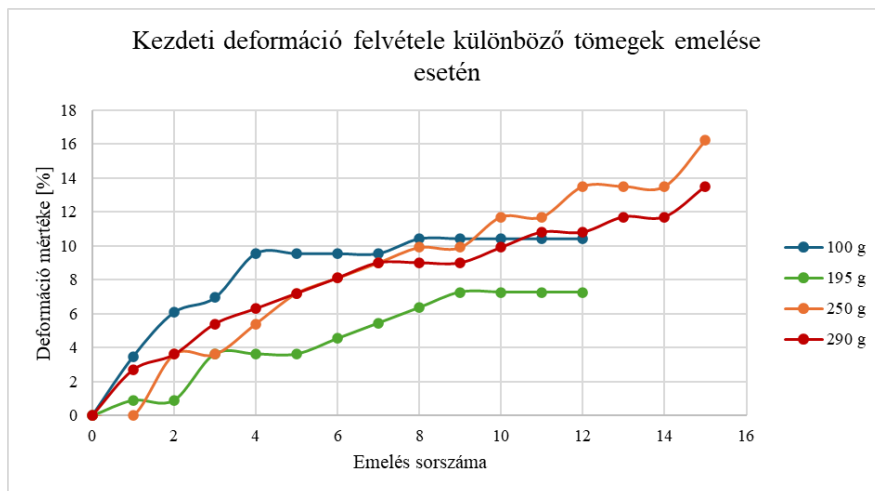
Emelt tömeg mérete	Összehúzóási idő (70°C-ra melegedés)	Lehülési idő (36°C-ra hűlés)	Huzal összehúzódt állapotbeli hossz	Felvett áram	Feszültség
0 g	-	-	-	4,6 A	1,2 V DC
100 g	16,28 s	70 s	155 mm	4,6 A	1,2 V DC
195 g	18,3 s	57 s	158 mm	4,6 A	1,2 V DC
290 g	18,28 s	69 s	163 mm	4,6 A	1,2 V DC
409 g	19,26 s	62 s	175 mm	4,6 A	1,2 V DC

A huzalra erősített K típusú hőelem segítségével bebizonyosodott, hogy a huzalnak nincs szüksége a gyártó által előírt 70°C-os átalakulási hőmérsékletre az

összehúzódáshoz, ugyanis az már kb. 40°C-on elkezdődik. Ebben ugyan szerepet játszhat a hőátadási idő, mivel a hőelem nem illeszkedik teljesen a vékony huzalra, de kijelenthető, hogy jóval 70°C alatt is elkezdődik a memóriaeffektus aktiválása. A felmelegedés, illetve a lehűlés időtartama nem függ a megemelt tömegtől. Ezen felül a huzal áramfelvétele és a rajta mérhető feszültségesés nem függ a megemelt tömegtől, így optimalizálni kell az egy huzallal megemelhető maximális tömeget. A teszt alapján cáfoljuk a [20] tanulmányban állított értékeket.

4.2.2 Kis tömegű emelések esetén létrejövő kezdeti deformáció felvétele

A korábbi tesztből kiderült, hogy a nagyobb tömegek egyszeri emelése mekkora maradandó megnyúlást okoz a huzal számára. Annak érdekében, hogy a huzalokból összeállított segédeszköz minél hosszabb élettartamú legyen és minél tovább kamatoztatható legyen az általa elért összehúzódás és annak segítségével kifejtett erő, kisebb tömegek ismétlődő emelésével került elvégzésre a következő méréssorozat. A mérések során mindig egy frissen edzett 220 mm egyenes huzal adta a 11 mm-es rádiuszokkal ellátott hullámformát, amelynek egyik vége az állványon volt rögzítve, a másik pedig az adott tömeggel volt terhelve. Kihűlt állapotban kézzel kinyújtásra kerültek a hullámformák, majd ráakasztásra kerültek a szabad végekre a tömegek. Ezt követően 1,4 VDC feszültség alá kerültek a huzalok, míg össze nem húzódtak. A mérésről készült összefoglaló diagramot a 2. ábra szemlélteti.



11. ábra: Ismétlődő terheléses teszt eredményei

A mérések alapján a huzal a legkedvezőbb működést 195 g-os tömeg emelésekor mutatta. Bár a deformáció kisebb volt, mint 100 g esetén, de ez az eltérés a huzalok edzésminőségéből is adódhat, így a mérések csak közelítő értékeket

adnak. Megfigyelhető azonban, hogy a nagyobb terhelések egyértelműen nagyobb maradandó deformációt okoztak. Összességében elmondható, hogy 195 g-ig a huzal alakváltozása elhanyagolható, e felett viszont már nem képes visszanyerni eredeti formáját, mivel a hullámalak egyre inkább kisimul. Ennek alapján egy huzal 195 grammnyi tömeggel megegyező ellenőrző méretezésére célszerű.

4.2.3 Deformáció hosszabb huzal esetén

A korábbi tesztek során észrevehető volt, hogy a maradandó deformáció elsősorban a huzal szélső részeit érintette. Ennek alátámasztásaként egy 300 mm hosszúságú egyenes huzal lett hullámformára edzve, amelyen ismétlődő terheléses tesztek kerültek elvégzésre 100 g-os, 195 g-os, illetve 290 g-os tömegek emelésével. Ekkor a huzalok áramfelvétele 5 A, a rájuk eső feszültség 1,9 VDC volt. Az eredmények a 3. táblázat szerint alakultak.

3. táblázat: Nyúlásnövekedés hosszabb huzal esetén

Megemelt tömeg	Emelés sorszáma	Összehúzódnás után mért hossz	Nyúlásnövekedés az első állapothoz képest
100 g	1.	180 mm	0 mm
	2.	181 mm	1 mm
	3.	182 mm	2 mm
	4.	184 mm	4 mm
	5.	184 mm	4 mm
	6.	184 mm	4 mm
	7.	185 mm	5 mm
	8.	186 mm	6 mm
	9.	186 mm	6 mm
	10.	187 mm	7 mm
195 g	1.	187 mm	7 mm
	2.	187 mm	7 mm
	3.	187 mm	7 mm
	4.	187 mm	7 mm
	5.	189 mm	9 mm
290 g	1.	190 mm	10 mm
	2.	190 mm	10 mm
	3.	190 mm	10 mm
	4.	190 mm	10 mm
	5.	192 mm	12 mm

A korábbi, rövidebb huzalnál 14 mm, míg a jelen kísérletben 12 mm deformáció volt tapasztalható összehúzott állapotban. Ez igazolja, hogy a maradandó deformáció leginkább a huzal szélső pontjain jelentkezik, mivel a hossz növelésével nem nőtt arányosan az alakváltozás mértéke. A 2 milliméterrel kisebb

eltérés valószínűleg az edzési egyenetlenségnek és a mérési módszer finomodásának tudható be.

4.2.4 Átalakulási hőmérséklet alatti minimális húzóerő mérése

Ahhoz, hogy az aktiválatlan állapotban lévő huzalok ne akadályozzák az emberi mozgást, fontos volt megbizonyosodni arról, hogy valóban nem szükséges nagy erő a szobahőmérsékletű huzal mozgatásához. A mérés során a 220 mm hosszúságú huzal került tesztelésre oly módon, hogy az egyik vége az állványra volt rögzítve, míg a másikra fokozatsan csökkentett tömegek kerültek. Az egyes terhelések 30 másodpercig tartottak, majd minden terhelés után újbóli aktiválással összehúzódnásra lett kényszerítve a huzal. Az eredmények a 4. táblázatban láthatóak.

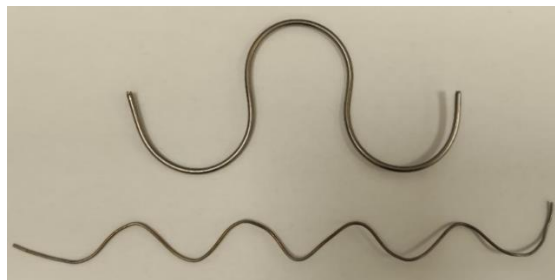
4. táblázat: Az alakváltozáshoz szükséges minimális húzóerő

Erőt kifejtő tömeg	Eredeti hossz	Kinyújtott hossz
0,39 kg	128 mm	161 mm
0,29 kg	128 mm	162 mm
0,19 kg	128 mm	160 mm
0,15 kg	128 mm	158 mm

A teszt során megállapítható, hogy már 0,15 kg, azaz megközelítőleg 1,47 N ellenerő is képes 128 mm-ről 158 mm-re nyújtani a huzalt fél perc alatt.

4.2.5 0,5 mm és 2 mm átmérőjű nitinol huzalok vizsgálata

Az 1 mm-es nitinol huzal mellett a 0,5 mm és 2 mm átmérőjű változatok is elemzésre kerültek. A 0,5 mm-es huzal nem bizonyult elég szilárdnak, ahhoz, hogy képes legyen nagyobb ellenerők leküzdésére, ezért nem került edzésre és tesztelésre sem. A 2 mm-es huzal esetében az edzéshez használt keret kialakítása nehézségekbe ütközött, mivel ekkora átmérőnél a nitinol rendkívül merev, túl nagy hajlítási sugara miatt pedig nem formálható kompakt módon. Összehasonlításként az 3. ábrán az 1 mm-es és a 2 mm-es huzalból készült hullámforma látható.



12. ábra: A 2 mm (felül), illetve az 1 mm átmérőjű huzalokból edzett hullámforma

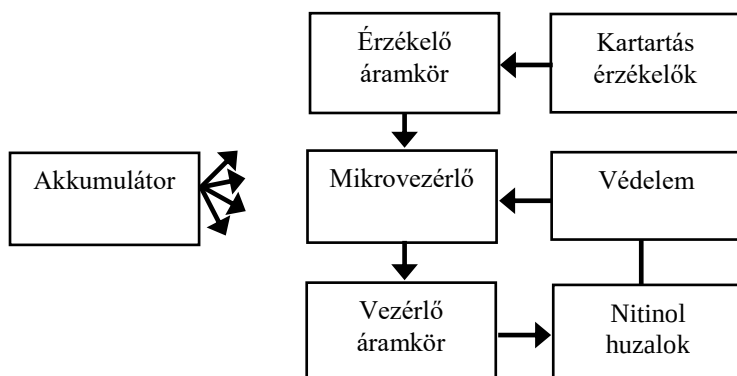
5 A segédeszköz prototípusának összeállítása

A nitinol alapvető viselkedésének megismerését követően egy 23 főből álló tesztsoporton végzett vállfelület mérés eredményeiből, illetve a kereskedelemben kapható kompressziós pántok szorítóerejének segítségével kiszámításra került a használandó nitinol huzalok pontos száma, valamint ebből adódóan azok vállra helyezésének koncepciója is meghatározásra került. A vállpánt prototípusa az alábbi ábrán látható.



13. ábra: A vállpánt prototípusa

A vállpánt kialakítása után a kartartást érzékelő áramkör, valamint a huzalokat vezérlő áramkör tervezése és összeállítása következett, amely egy 3 cellás, 4100 mAh kapacitású, 30C LiPo akkumulátorral kiegészítve képes az eszköz biztonságos üzemeltetésére. Az áramkörben helyet kapott többek között egy hőmérő a túlmelegedés ellen, áram-, illetve feszültségmonitorozó részek, 3 db flex szenzor a kartartás érzékeléshez, 4 db FET a huzalcsoportok vezérléséhez, illetve egy hibákról értesítő hangszóró. Az áramkör üzemeltetéséhez szükséges program Arduino IDE környezetben készült. Az áramkör blokkvázlata az alábbi ábrán látható.



14. ábra: Az érzékelő és vezérlő áramkör blokkvázlata

A mechanikai összeállítás során a nitinol huzalok egy igen laza szorítással rendelkező vállpántra lettek varrva. Külön figyelmet kapott a flex szenzorok pozíciója, illetve a huzalok által generált hő elleni védelem. A vezérlőelektronika számára egy hordozható 3D nyomtatott doboz készült. Az így összeállított készüléket különböző teszteknek vetettük alá, amelyek során bebizonyosodott, hogy van relevanciája az eszköznek és érezhető hatást fejthet ki a viselője számára elülső váll diszlokáció szempontjából veszélyes kartartás esetén.

Összefoglalás

A kutatási eredményeink felhasználásával készült prototípuson végzett tesztek bizonyították, hogy egy olyan orvosi segédeszközként használható tartásjavító készülék alapjait sikerült lefektetnünk, amely a jövőben jelentősen javíthatja a laza vállízülettel rendelkezők életminőségét. Emellett a koncepció számos más mozgásszervi rehabilitációban használható segédeszköz kifejlesztéséhez adhat mintát.

A készülék hatékonyságának növeléséhez további tesztek szükségesek akár más átmérőjű nitinol huzalokkal, illetve speciális fonási technikák kipróbálásával. Az áramkör fejlesztésénél a kompaktabb kialakítás és az akkumulátor töltésének megoldása adhat még feladatot. A továbbfejlesztés során a kiértékelhető, működéssel kapcsolatos adatok begyűjtéséhez a használt vezérlőmodul WiFi kapcsolatát tervezzük használni. Ez lehetőséget ad majd PC-n vagy mobileszközön történő valós idejű monitorozásra.

Források

- [1] C. P. Dosdon és F. A. Cordasco, „Anterior Glenohumeral Joint Dislocations,” *Orthopedic Clinics of North America*, pp. 507-518., 2008. október
- [2] M. A. Varacallo, M. A. Musto és D. S. Mair, Anterior Shoulder Instability, StatPearls, 2023.
- [3] H. e. a. Sofu, „Recurrent anterior shoulder instability: Review of the literature and current concepts,” *World Journal of Clinical Cases*, pp. 676-682., 2014. november 16.
- [4] H. e. a. Alkaduhimi, „A systematic and technical guide on how to reduce a shoulder dislocation,” *Turkish Journal of Emergency Medicine*, pp. 155-168, 2016 november 18.
- [5] R. Norlin, „Intraarticular pathology in acute, first-time anterior shoulder dislocation: An arthroscopic study,” *Arthroscopy: The Journal of Arthroscopic and Related Surgery*, 9. kötet, 5. szám, pp. 546-549., 1993.

- [6] H. J. Appell, „Muscular atrophy following immobilisation. A review,” *Injury Clinic*, pp. 42-58., 1990.
- [7] Physiopedia, „Shoulder Dislocation,” www.physio-pedia.com, 2025.
- [8] Core Em, <https://coreem.net/core/shoulder-dislocation/>. [Hozzáférés dátuma: 2025 március 13.].
- [9] H. P. e. a. Baker, *Sports Health*, pp. 105-110, 2022. január 26.
- [10] J. e. a. Sárosi, „Pneumatikus mesterséges izom által működtetett rehabilitációs eszközök tervezése és kivitelezése,” *Jelenkori Társadalmi és Gazdasági Folyamatok*, 2016.
- [11] F. Daerden és D. Lefeber, „Pneumatic Artificial Muscles: actuators for robotics and automation,” *European Journal of Mechanical and Environmental Engineering*, 47. kötet, 1. szám, 2002.
- [12] N. e. a. El-Atab, „Soft Actuators for Soft Robotic Applications: A Review,” *Advanced Intelligent Systems*, 2. kötet, 10. szám, 2020.
- [13] Y. Bar-Cohen, „Electroactive Polymers as Artificial Muscles-Capabilities, Potentials and Challenges,” in *Handbook on Biomimetics*, 11. kötet, Pasadena, 2000.
- [14] S. K. Manna és V. N. Dubey, „Comparative study of actuation systems for portable upper limb exoskeletons,” *Medical Engineering & Physics*, 60. kötet, pp. 1-13., 2018.
- [15] D. C. Lagoudas, *Shape Memory Alloys*, Springer, 2008.
- [16] T. Duering, A. Pelton és D. Stöckel, „An overview of nitinol medical applications,” *Materials Science and Engineering: A*, pp. 149-160., 15. 12. 1999.
- [17] R. E. Cortijo, M. Escalona és V. Laverde, „Hand Prosthesis with Nitinol: Shape Memory Alloy,” in *Springer Nature Switzerland*, Universidad Israel, Francisco Pizarro E4-142, Quito, Ecuador, 2020.
- [18] M. Mubeen és A. Ahmad, „Nitinol: An Emerging Shape Memory Alloy (SMA),” *Weekly Technology Times*, 2021.
- [19] J. M. G. Fuentes, P. Gümpel és J. Strittmatter, „Phase Change Behavior of Nitinol Shape Memory Alloys,” *Advanced Engineering Materials*, pp. 437-451., 2002.
- [20] M. Senthilkumar, „Analysis of SMA Actuated Plain Flap Wing,” *Journal of Engineering Science and Technology Review*, pp. 39-43., 03. 2012.
- [21] SmartWires, „Flexinol® - Frequently asked questions”.

Safety Science of Servo Motor Systems

Tamás Tornai, László Gogolák, Igor Fürstner

Tamás Tornai, Doctoral School on Safety and Security Sciences, Obuda University, Népszínház utca 8., 1088 Budapest, Hungary,
tam.tornai@stud.uni-obuda.hu

László Gogolák, Department of Mechatronics and Automation, Faculty of Engineering, University of Szeged, 6720 Szeged, Hungary,
gogolak@mk.u-szeged.hu

Igor Fürstner, Obuda University, Bánki Donát Faculty of Mechanical and Safety Engineering, József körút 6. , 1088 Budapest, Hungary,
furstner.igor@bgk.uni-obuda.hu

Abstract: Servo motor system are key elements of modern industrial automation and robotics, playing an increasingly complex role in achieving precision motion control and safety critical processes. From the perspective of safety science, the study of these systems covers several closely related areas: functional safety, cyber security, as well as system reliability and fault detection. The safety of servo motor systems is based not only on the presence of protective functions, but also on their integration, the reliability of communication protocols, and the capability of data driven decision making. In this investigation, the aim of safety science is to provide a comprehensive theoretical and practical framework for evaluating the operational integrity, vulnerability, and protection of automated systems. The purpose of this study is to give an overview of the security challenges of servo motor systems and to outline possible research directions at the intersection of mechatronics and safety science.

Keywords: Mechatronic systems ,Motion Control, Servo motor systems, Safety Engineering, System

1 Introduction

Servo motor systems are fundamental elements of modern industrial automation, providing precise positioning, high dynamic and reliable operation in applications ranging from production lines to robotics , logistisc system, CNC machines and even medical devices. The fast response capabilities and high power density of servo drives enable accurate and efficient motion control, while this high level of technical sophistication also means that their malfunction can potentially cause significant physical and material damage [1,2,3,4,5]. The safety science of servo

motors is therefore primarily built on physical and functional safety. The hazards arising during the operation of servo systems include unexpected accelerations, overspeed, overloads, mechanical collisions, dangerous torque levels, faulty brakes or improperly managed emergency stops. To prevent these, modern servo drives are equipped with a wide range of built-in safety functions, such as Safe Torque Off (STO), Safe Stop $\frac{1}{2}$ (SS1/SS2), Safe Limited Speed (SLS), Safe Maximum Speed (SMS), Safe Limited Torque (SLT) or Safe Brake Control (SBC) [6, 15, 16, 17]. The proper integration, validation and maintenance of these functions are essential to avoid accidents. The operating environment of servo motor systems is extremely diverse; it ranges from the high-speed movements of industrial robot arms to submicron positioning accuracy on precision manufacturing lines. Ensuring functional safety in such a heterogeneous environment is a complex task, as it requires consideration of the mechanical loads, actuator behavior, control algorithms and human-machine interaction safety. Standardized safety requirements such as IEC 61508, ISO 13849 or IEC 62061 provide a unified framework for identifying and reducing risks and for determining the necessary safety integrity levels.

Although servo motors are increasingly becoming networked intelligent devices and thus form part of cyber-physical systems to some extent, cybersecurity in the safety science of servo systems plays a supporting rather than primary role. The communication protection mechanisms such as authenticated communication protocols, password management or basic network protection aim primarily at maintaining functional safety rather than classical information security. In the case of servo motors, the most critical risks still stem from physical failures, improper control or incorrect safety configuration.

The safety science of servo motor systems is therefore mainly a multidisciplinary engineering field, in which mechanical, electrical and control engineering disciplines are closely interconnected. In modern industrial applications, increasing emphasis is placed on real-time condition monitoring, fault detection, diagnostics and predictive maintenance, which enable early detection of failures and activation of safety functions when necessary.

The aim of this study is to provide a comprehensive overview of the physical and functional safety of servo motor systems. The article presents the main risk factors, the mechanical and control engineering solutions required for safe operation, the relevant industrial standards, and the methods by which fault-free and safe operation of servo systems can be ensured. In addition, it briefly addresses the cyber-physical aspects which, although they play a background role, still contribute to the reliable operation of the systems.

2 Safety requirement and challenges in servo drives

2.1 Physical hazards in servo motor systems

The physical risks associated with servo motor systems arise mainly from their high dynamic capabilities and the specific characteristics of electric drive technology. Servo motors are capable of rapid accelerations and highly precise positioning, which are beneficial in industrial applications but can also lead to severe hazards if the system behaves unexpectedly. Overspeed, uncontrolled acceleration, sudden direction changes or slipping may generate dangerous mechanical loads. Typical physical risks include drivetrain overload leading to overheating or mechanical damage, shaft torque shocks, resonance-induced vibrations and gradual bearing wear[3,4,5]. Brake malfunctions, particularly in vertically loaded axes, can result in falling accidents with serious consequences. Industrial experience shows that improperly configured or poorly maintained servo systems frequently exhibit irregular motion behaviour [2,14]. Incorrect parameterisation, unsuitable acceleration profiles or missing limit stops may all contribute to unsafe operation. To mitigate such risks, modern industrial systems increasingly integrate automated diagnostic functions and real-time monitoring modules capable of detecting abnormal physical behaviour before hazardous conditions develop.

2.2 Functional safety and built-in safety functions

A core component of servo system safety is functional safety, which ensures that failures do not lead to dangerous behaviour and that the system transitions into a predefined safe state [6,7,8,9]. Modern servo drives implement a wide range of built-in safety functions defined by international standards. Among the most important are Safe Torque Off (STO), which prevents torque generation; Safe Stop 1 and 2 (SS1/SS2), which provide controlled or torque-free stopping; Safe Limited Speed (SLS), which restricts maximum speed; Safe Limited Torque (SLT), which constrains mechanical loading; Safe Maximum Speed (SMS), which enforces absolute speed boundaries; and Safe Brake Control (SBC), which ensures reliable brake actuation in critical lifting or vertical axes. These functions belong to the safety category defined in IEC 61800-5-2 and are supported natively by most industrial servo drives [6,7,8].

Functional safety, however, is not achieved merely by enabling drive-level functions. A reliable system requires an appropriate safety architecture, certified sensors, redundant measurement channels and validated control logic. Misconfiguration of safety parameters such as excessive speed limits or incorrect deceleration profiles may provide a false sense of security and fail to adequately protect operators or equipment [1,2,11]. Correct integration therefore requires

validation procedures based on standards such as IEC 61508, IEC 62061 and ISO 13849, which define the required Safety Integrity Level (SIL) or Performance Level (PL) for the application.

2.3 Safety architectures and system level approach

Ensuring safety in servo systems requires a system-wide perspective [11,14,15,16,17]. Servo drives typically operate as part of larger automated machines or robotic cells, in which mechanical structures, sensors, communication networks and control logic must all contribute to safe operation. Safety PLCs coordinate safety functions and communicate with drives through protocols such as Safety over EtherCAT, PROFIsafe or CIP Safety [6,11,18]. Although some of these mechanisms include authentication or data-integrity checks, their main purpose is functional safety: ensuring deterministic behaviour and enabling rapid detection of faults. The effectiveness of a safety system largely depends on its architecture. Redundant sensors, diagnostics-enabled encoders, multi-channel safety relays and validated brake logic enhance fault tolerance and allow the system to react quickly to abnormal conditions [2,11,15]. Simulation tools, including MATLAB/Simulink environments, increasingly play a key role in designing and validating safety functions before real deployment. Recent literature highlights the growing use of mathematical models and virtual prototyping to analyse servo behaviour under overspeed, overload or mechanical failure scenarios. The present study builds on these approaches by evaluating servo system behaviour in a simulation environment and analysing how predictive and machine-learning-based supervision layers can enhance safe operation.

3 Methodology

This section presents the modelling framework and the multi-layered safety supervision architecture developed to analyse and improve the safe operation of servo motor systems. The methodology combines classical control theory, functional safety mechanisms, predictive modelling techniques and machine learning based decision support. All components were implemented and evaluated in a MATLAB based simulation environment to ensure reproducibility and precise parametric analysis [19,20].

3.1 Servo motor Dynamic Model

A simplified but dynamically accurate model of a permanent magnet servo motor was adopted for the simulation. The mechanical dynamics are governed by:

$$J \frac{d\omega(t)}{dt} = r(t) - \tau(t) - \tau_L(t) - b\omega(t) \quad (1)$$

where J is the rotor inertia, b the viscous damping coefficient, $\omega(t)$ the angular velocity, $\tau(t)$ the motor torque, and $\tau_L(t)$ an external disturbance torque. The load torque was implemented as a time-varying disturbance, and small measurement noise was added to the speed feedback to emulate realistic encoder behaviour.

The simulation was performed with a sampling time of 10^{-4} s, providing high-resolution dynamic analysis.

3.2 PI-Based Speed Control Layer

The core control layer is a classical PI (Proportional–Integral) regulator:

$$\tau_{PI}(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt, \quad e(t) = \omega^*(t) - \omega_m(t) \quad (2)$$

Saturation limits are applied:

$$\tau_{PI}(t) \in [-\tau_{max}, \tau_{max}] \quad (3)$$

with an anti windup mechanism that stops integral accumulation when the output saturates.

This PI controller represents the baseline industrial motion control behaviour, and its output serves as the starting point for both predictive and safety oriented modifications.

3.3 Functional Safety Layer: State Machine Architecture

A deterministic safety state machine was developed in accordance with the safety functions defined in IEC 61800-5-2. The architecture distinguishes four operational states: a Normal mode, in which no intervention is required, a SLS mode that restricts the maximum permissible speed, a SS1 mode that performs a controlled deceleration and STO mode in which all torque generating functions of the drive are disabled.

Transitions between these states occur when predefined safety related conditions are violated. The controller moves the system toward a higher safety level whenever the measured speed exceeds allowed limits, the motor torque or current

approaches hazardous values, the observed acceleration indicates a tendency toward instability, or when any of the prescribed safety margins is breached. Through continuous monitoring and deterministic state evaluation, the safety state machine ensures that the servo drive enters the safety possible operational whenever potentially dangerous behaviour is detected.

The safety state machine produces a corrected torque:

$$\tau_{safety}(t) = f_{SM}(\omega_m(t), \tau_{cmd}(t), i(t)) \quad (4)$$

which overrides all previous torque commands.

This block represents the reactive layer of functional safety.

3.4 Analytical Predictive Supervisor

To reduce unnecessary safety activations and smooth the system's behaviour, an analytical model-based supervisor was implemented. The short-horizon prediction of the angular velocity is obtained using:

$$\hat{\omega}(t + T_{pred}) = \omega(t) + \frac{T_{pred}}{J} (\tau_{PI}(t) - \tau_L(t) - b \omega(t)) \quad (5)$$

If the predicted velocity approaches the SLS threshold, the supervisor reduces the PI torque before unsafe conditions occur. This layer provides a simple but effective proactive limitation and serves as the analytical baseline for the machine-learning supervisor.

3.5 Machine Learning Supervisor

The key contribution of this study is Random Forest (RF) based supervisor capable of learning optimal torque corrections directly from data.

3.5.1 Training Data Generation

A synthetic dataset consisting of 5000 samples was generated under randomized operating conditions, in which the motor speed was deliberately selected around the SLS boundary and the PI controller output as well as the external load torque were varied to represent diverse and realistic dynamic scenarios. For each operating point, the analytical predictive supervisor was applied to compute the corresponding ideal safe torque value, which served as the regression target for model training. In this way, the Random Forest model learned the mapping between the measured speed and the PI torque command, and the torque reduction necessary to prevent approaching the safety limit. As a result, the RF supervisor approximates the function

$$\tau_{RF} = f_{RF}(\omega, \tau_{PI}) \quad (7)$$

capturing optimal preventive intervention without requiring any explicit knowledge of the underlying physical equations.

3.5.2 RF model Training

Listing 1 shows the MATLAB command used to train the bagged ensemble model with 20 trees.

```
Mdl = fitensemble(X,Y,"Method","Bag","NumLearningCycles",20);
```

The model was compacted for real time use. Training time less than 0.5 seconds.

3.5.3 Runtime Integration

Every 100 simulation steps a new RF prediction is computed:

$$\tau_{RF}(t) = f_{RF}(\omega_m(t), \tau_{PI}(t)) \quad (8)$$

Then a smoothing filter is applied:

$$\tau_{RF}(t) = \alpha \tau_{RF}(t-1) + (1-\alpha) \tau_{ra\omega}(t) \quad (9)$$

with $\alpha = 0,9$ for actuator friendly smooth transitions. The RF supervisor replaces the PI torque if it predicts unsafe future motion.

3.6 Hierarchical Torque Command Selection

The command torque is determined through a hierarchical selection, where the PI output may be reduced by the analytical predictor, further refined the Random Forest supervisor, and the ultimately overridden by the safety state machine whenever required. This hierarchy, where safety overrides both supervisory layers and the PI controller, ensures stable operation and prevents hazardous conditions.

3.7 Simulation Scenarios

To evaluate the effectiveness of the proposed supervisory architecture, three simulation scenarios were carried out under identical operating conditions. In the first scenario, the system relied solely on the baseline PI speed controller combined with the functional safety state machine, representing the conventional industrial control structure without predictive capabilities. The second scenario incorporated the analytical predictive supervisor, which modified the PI torque output whenever the short term model based prediction indicated that the motor

speed might approach the SLS boundary. In the third scenario, the Random Forest based supervisor was activated, replacing the analytical prediction layer and providing a data driven torque limitation strategy trained to anticipate unsafe behaviour.

All three scenarios were executed using the same reference trajectory, measurement noise characteristics and load disturbance profile to ensure a fair and consistent comparison. Throughout each simulation, the system dynamics were recorded, including the actual angular velocity, the PI and supervisory torque commands, the safety limited torque enforced by the state machine, the resulting motor current and the evolution of the safety state over time. These outputs collectively enable a detailed evaluation of how each supervisory method influences stability, overspeed prevention and the overall need for safety intervention.

4 Results

Four simulation scenarios were evaluated to compare the behaviour of the servo system under different supervisory strategies. All scenarios used identical reference trajectories, disturbances and measurement noise, ensuring a strictly controlled one to one comparison. The evaluation focuses on velocity tracking, torque behaviour and the activation of safety mechanisms.

4.1 Forced Safety Activation

A dedicated validation scenario was used to verify the correctness of the safety state machine. The motor was deliberately driven beyond the SMS limit causing a deterministic transition through SLS and SS1 before reaching STO as illustrated in Figure 1. This configuration ensures that the safety architecture behaves exactly as defined by IEC 61800-5-2 and provides a reliable final protective layer.

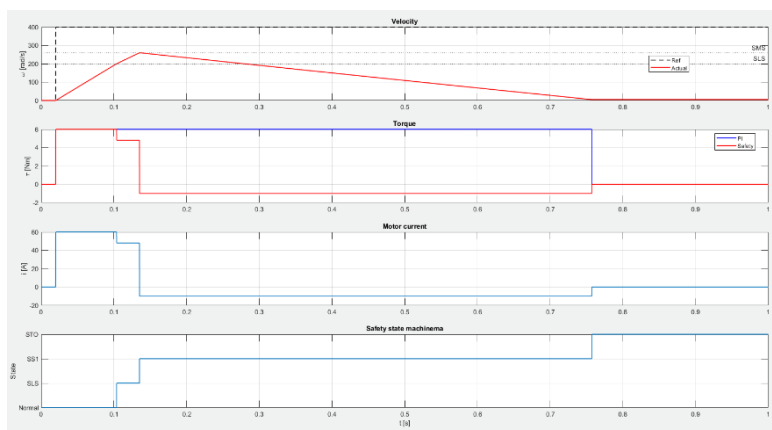


Figure 1

Safety state transitions during a forced overspeed event.

4.2 Baseline configuration

In the baseline configuration the PI controller drives the system towards the reference until the SLS threshold is approached (Figure 2.). Due to load disturbance and measurement noise, the PI output exhibits noticeable overshoot tendencies. As the motor nears the speed limit, the safety layer intervenes and limit the torque, stabilising the velocity but introducing abrupt transitions and elevated current peaks. The baseline case therefore represent safe but non optimal behaviour, dominated by reactive safety intervention.

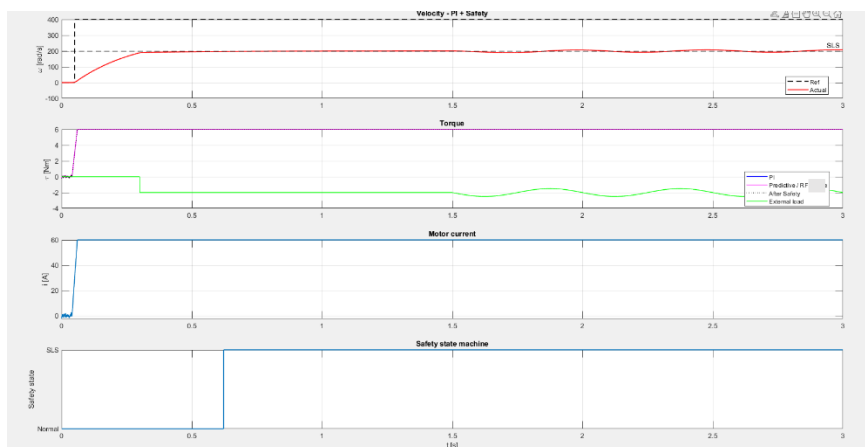


Figure 2

Baseline PI control with safety intervention (PI + Safety).

4.3 Analytical Predictive Supervisor

Introducing the analytical predictive supervisor substantially improves system behaviour (Figure 3.). By reducing the PI torque before the SLS boundary is reached, the predictive layer eliminates overshoot prevents safety intervention entirely. Torque and current signals become smoother, and the motor converges gradually to the desired speed. The model based supervisor thus provides a deterministic and conservative control action that efficiently mitigates overspeed tendencies under disturbance.

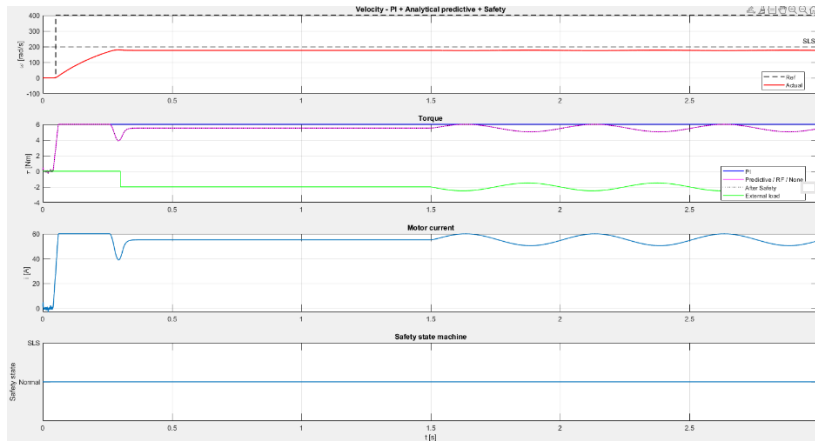


Figure 3

Servo Control with PI + Analytical predictive + Safety

4.4 Random Forest Supervisor

The RF supervisor reproduces the main effects of the analytical model despite having no explicit knowledge of the physical system (Figure 4.). It restricts torque proactively keeps velocity within safe limits and avoids activation of the safety state machine throughout the simulation. Although the RF output shows slightly higher variability, overall behaviour remains stable and safe. This confirms that a trained data driven model can serve as a lightweight surrogate for analytical prediction in real time applications.

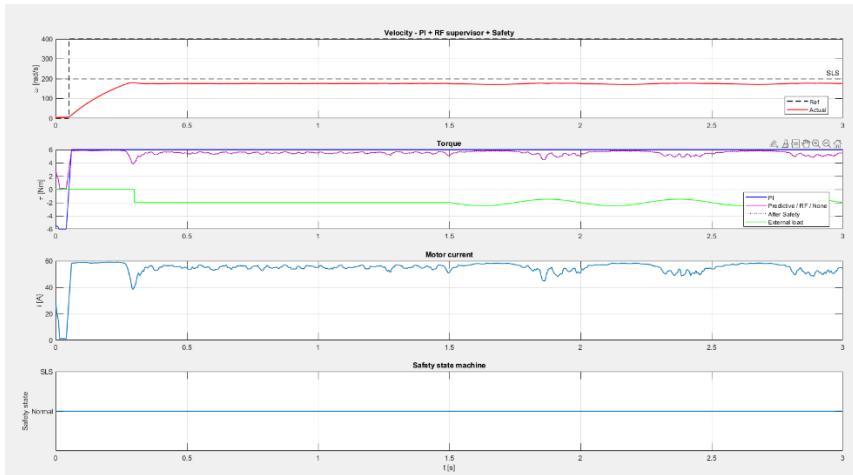


Figure 4

Servo Control with PI + RF Supervisor + Safety

5 Discussion

The simulation results demonstrate that the safety behaviour of servo motor systems can be significantly improved by incorporating supervisory layers above the conventional PI controller. The baseline PI + Safety configuration showed that the drive frequently approached the SLS boundary and required direct safety level torque clipping, indicating limited disturbance robustness. When the analytical predictive supervisor was applied, the system maintained smooth velocity tracking and stable torque behaviour even under varying load safety intervention was no longer required, confirming the effectiveness of model based proactive limitation. The Random Forest supervisor reproduced the analytical behaviour with only minor variability, despite having no explicit knowledge of the motor model. This confirms that data driven methods can internalise safety aware response patterns when trained with sufficiently rich synthetic data. Importantly, the RF based controller also prevented overspeed and maintained torque within safe limits, keeping the safety stat machine in its Normal state throughout the run. The dedicated fault injection scenario further validated the correctness of the safety architecture, as the system transitioned deterministically through SLS and SS1 to STO, exactly defined by IEC 61800-5-2. Overall, the results show that predictive and data driven supervisors can significantly reduce the reliance on safety level intervention and contribute to smoother torque behaviour, while fully preserving the functional safety guarantees of the underlying safety layer.

6 Conclusion

This study introduced a multi layered safety oriented control architecture for servo motor systems, combining classical PI control, an analytical predictive supervisor, a machine learning based Random Forest supervisor and an IEC compliant safety state machine. The proposed framework successfully prevented overspeed, reduced torque peaks under load disturbances and ensured that the safety layer intervened only when strictly necessary. The data driven supervisor achieved performance close to the analytical method demonstrating that machine learning models can effectively replicate safety aware control behaviour without explicit system knowledge.

The architecture provides a practical pathway for integrating predictive and AI based techniques into industrial servo drives while maintaining strict functional safety requirements. Future work will focus on hardware in the loop validation, the integration of encoder level diagnostics and the extension of the machine learning model toward anomaly detection and predictive maintenance.

References

- [1] Z. Dong, S. Chen, Z. Sun, B. Tang, and W. Wang, "A servo control algorithm based on explicit MPC and extended state observer," *Actuators*, vol. 14, no. 6, p. 281, 2025.
- [2] F. Kraus and M. Yazdi, "Functional safety and condition monitoring in drive systems," *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 15, no. 3, pp. 18–30, 2021.
- [3] M. Jafari and A. Nouri, "Dynamic modelling and hazard analysis of servo motor failures," *ISA Transactions*, vol. 132, pp. 44–58, 2023.
- [4] H. Liu, X. Zhang, and P. Li, "Analysis of torque ripple, vibration and resonance in servo drive applications," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 201, p. 110480, 2023.
- [5] K. Shibata, A. Yamazaki, and T. Sato, "Vibration propagation and mechanical hazard risk assessment in servo-driven axes," *Precision Engineering*, vol. 84, pp. 262–272, 2024.
- [6] IEC 61800-5-2:2016, Adjustable speed electrical power drive systems Safety requirements Functional, IEC, 2016.
- [7] IEC 61508, Functional safety of electrical/electronic/programmable systems, Parts 1–7, IEC, 2010.
- [8] ISO 13849-1:2015, Safety of machinery – Safety-related parts of control systems, ISO, 2015.
- [9] IEC 62061:2021, Safety of machinery – Functional safety of control systems, IEC, 2021.
- [10] J. O. Krah and J. Holtz, "Safety-related architecture and redundancy concepts for low-cost drives," in *Proc. SGRE Conf.*, 2024
- [11] N. Brubaker et al., "INCONTROLLER: State-sponsored attack tools targeting industrial control systems," *Google Mandiant, Threat Report*, 2022.
- [12] CISA, "ICSA-23-075-02: Siemens SINAMICS Drive vulnerabilities," U.S.

Dept. of Homeland Security, 2023.

[13] S. Humayed, J. Lin, F. Li, and B. Luo, "Cyber-physical systems security: A survey," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 4, no. 6, pp. 1802–1831, 2017.

[14] N. Navet and H. Song, "Distributed safety monitoring for networked servo control systems," in *Proc. IFAC World Congress*, 2020.

[15] Rockwell Automation, Kinetix 5700: Safe Speed Monitoring, Publication MOTION-AT005A-EN-P, 2018.

[16] Siemens AG, SINAMICS S120 Safety Integrated Function Manual, 2017.

[17] Beckhoff Automation, TwinSAFE: Safety Technology Documentation, 2022.

[18] ISO 10218-1:2025, Robots and robotic devices Safety requirements for industrial robots ISO, 2025.

[19] MathWorks, *Developing Safe Industrial Equipment Using Simulation*, Webinar, 2025.

[20] H. Kato and T. Fujii, "Hardware-in-the-loop fault injection for servo drive safety validation," *Control Engineering Practice*, vol. 141, p. 105768, 2025.

Numerical Ellipsometry Analysis (NEA) of Nanoscale Gold Gratings

Chao Zeng^{1,2}, Shayesteh Raeisi^{1,3}, Szanto Geza¹, Jeetendra Gour⁴, Thomas Siefke^{4,5,6}, Miklós Fried^{1,2}, Péter Petrik^{*1,3}

1. Centre for Energy Research, Institute of Technical Physics & Materials Science, Konkoly-Thege Rd. 29-33, 1121 Budapest, Hungary.

2. Doctoral School on Materials Sciences and Technologies, Óbuda University, 1034 Budapest, Hungary.

3. Department of Electrical Engineering, Institute of Physics, Faculty of Science and Technology, University of Debrecen, Bem tér 18, Debrecen, 4026, Hungary.

4. Friedrich Schiller University Jena, Institute of Applied Physics, Jena, Germany

5. Fraunhofer IOF, Jena, Germany

6. University of Applied Sciences, Jena, Germany

Corresponding author: Miklos Fried, fried.miklos@kvk.uni-obuda.hu, Péter Petrik, petrik.peter@ek.hun-ren.hu

Abstract: This study presents a comprehensive numerical ellipsometry analysis of gold nanograting by integrating an advanced simulation platform, COMSOL Multiphysics. The proposed hybrid approach enables detailed investigation of the optical properties and polarization-dependent responses of plasmonic nanostructures. Simulations were conducted for various incident angles ($\Phi = 60^\circ, 65^\circ, 70^\circ$, and 75°) and grating periods (CD = 70 and 110 nm) to evaluate the influence of structural parameters on the ellipsometry spectra. The simulated results show a good agreement with experimental ellipsometry measurements obtained from fabricated nanograting, leaving room for further improvement of the combined method. This work demonstrates that the integration of numerical ellipsometry modeling with finite-element and finite-element–frequency-domain solvers provide a powerful and efficient tool for the design and optimization of high-sensitivity optical and plasmonic sensors.

Keywords: Numerical ellipsometry, Gold nanograting, ellipsometry spectra, plasma resonance

1. Introduction

Diffraction gratings are fundamental optical components that play a crucial role in manipulating and controlling light propagation [1]. Their periodic micro- or nanostructures introduce spatial modulation of the amplitude or phase of incident electromagnetic waves, resulting in the diffraction of light into multiple directions according to wavelength [2]. This wavelength-dependent diffraction enables gratings to perform spectral dispersion, making them indispensable in both fundamental research and practical optical systems. Owing to their unique optical and structural characteristics, diffraction gratings have been widely utilized in a broad range of applications, including optical coupling, spectral filtering, optical communication, laser engineering, thin-film stabilization, photodetection, solar energy concentration, and spectroscopic analysis[3].

In recent years, the study of metallic gratings has opened a new research frontier in the field of diffractive and plasmonic optics [4]. Unlike dielectric gratings, metallic gratings exhibit distinctive optical properties arising from the excitation of surface plasmon polaritons (SPPs)—collective oscillations of free electrons at the metal–dielectric interface that couple with incident electromagnetic waves [4, 5]. These plasmonic resonances enable strong light–matter interactions and electromagnetic field confinement beyond the diffraction limit, providing novel mechanisms for manipulating light at the nanoscale [6]. As a result, metallic gratings have attracted significant attention from researchers worldwide and have found extensive applications in areas such as plasmon-enhanced lithography, near-field optical microscopy, light extraction and modulation in light-emitting diodes (LEDs), and high-sensitivity photodetection [7]. Furthermore, their ability to enhance local electromagnetic fields and improve light coupling efficiency has demonstrated great potential in industrial sensing, military optical systems, and biomedical diagnostics, establishing metallic gratings as key elements in the development of next-generation photonic and optoelectronic technologies.

Despite the extensive research on diffraction and plasmonic phenomena in metallic gratings, accurately describing and predicting their optical responses remain challenging due to the complex coupling between incident electromagnetic waves and surface plasmon modes. The optical behavior of such structures is highly sensitive to factors such as the grating period, groove depth, duty cycle, dielectric environment, and the intrinsic dielectric function of the metallic material. Traditional analytical approaches, while offering physical insight, are often insufficient for quantitatively reproducing experimental results, especially in nanostructured systems exhibiting strong near-field interactions and non-linear effects [8].

To solve these challenges, this work aims to establish a comprehensive numerical and experimental framework for investigating the optical characteristics of metallic gratings. The primary objectives are: (1) to model and analyze the plasmonic and diffractive responses of metallic gratings using advanced electromagnetic simulation tools such as COMSOL Multiphysics; (2) to characterize their optical constants and structural parameters through spectroscopic ellipsometry; and (3) to correlate simulation results with experimental measurements for validating physical models and optimizing design parameters. Through this integrated approach, the work seeks to deepen the understanding of light–matter interactions in periodic metallic nanostructures and to provide theoretical and experimental support for their application in high-performance photonic and sensing devices [9].

2. Sample preparation and numerical simulation environment

2.1 Sample preparation

The fabrication of nanostructured metallic gratings typically involves a sequence of high-precision micro–nanofabrication processes designed to achieve periodic metallic patterns with subwavelength dimensions. These structures are crucial for manipulating light–matter interactions at the nanoscale, particularly for applications in plasmonics, sensing, and photonic devices [10, 11]. In this work, periodic gold gratings were fabricated using a top-down approach based on electron beam lithography (EBL). This technique was chosen to achieve the high pattern fidelity required by the designed structure. The main fabrication process of the gold gratings is illustrated in Fig. 1, process began with an optical-grade fused silica substrate, onto which a Cr/Au/Cr layer was sequentially deposited to provide adhesion, a functional gold layer, and a chromium hard mask for subsequent pattern transfer. The desired grating pattern was defined in the resist layer using electron-beam lithography (EBL), followed by resist development to form high-resolution nanoscale features. The pattern was first transferred into the top Cr hard mask using ion beam etching (IBE). Afterward, the remaining resist was completely removed by oxygen plasma ashing to prevent contamination and ensure accurate pattern definition. The grating pattern was then transferred from the Cr mask into the underlying Au layer via reactive ion beam etching (RIBE), achieving anisotropic sidewalls and precise dimensional control through a combination of physical sputtering and chemical etching mechanisms. Finally, the residual Cr hard mask was removed using inductively coupled plasma (ICP) etching, resulting in the final periodic gold grating structure.

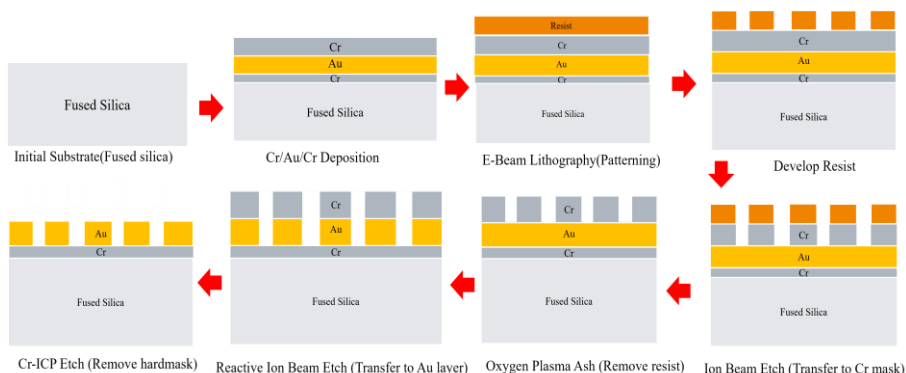


Figure1. Schematic of the fabrication steps for Au nanograting

Periodic gold gratings (period $\Lambda = 200$ nm) were patterned on glass substrates by electron-beam lithography. Gold films of thickness ($d_g = 60$ nm) were deposited by magnetron sputtering and patterned by lift-off, yielding line widths (CD) of 70, 90, 110 and 130 nm, as shown in Fig. 2.

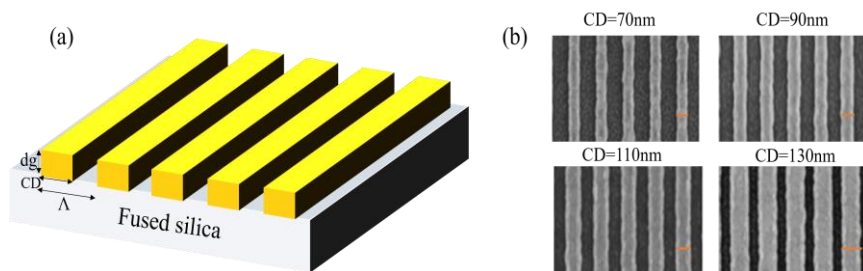


Figure 2. (a) Schematic and (b) SEM images of Au gratings fabricated on fused silica substrate

2.2 Numerical simulation environment

In this simulation, the Wave Optics Module of COMSOL Multiphysics was used to simulate light propagation through diffraction gratings. The optical response was defined using S-parameters obtained from the “Electromagnetic Waves, Frequency Domain” interface [12, 13]. The simulation is based on Rigorous Coupled-Wave Analysis (RCWA). In this model, an electromagnetic plane wave is incident from the air region onto the sample, and the light interacting with the structured surface is collected from both the substrate and the

superstrate. And we can get key optical parameters including reflectance (R), transmittance (T), the Brewster angle, and the electric-field distribution can be extracted. These quantities are obtained by solving the frequency domain partial differential equations (1.1) governing the electric and magnetic fields (E and H) during wave propagation through the structure.

$$\nabla \times \mu_r^{-1} (\nabla \times E) - \omega^2 \varepsilon_0 \mu_0 (\varepsilon_r - i\sigma / \omega \varepsilon_0) E = 0 \quad (1.1)$$

Here, μ_r is the relative permeability, ε_0 is the vacuum permittivity, μ_0 is the vacuum permeability, ε_r is the relative permittivity, and σ is the electrical conductivity.

To model TE (s-polarization) and TM (p-polarization) polarized illumination in a two-dimensional layout, the field vectors must be assigned in accordance with the incidence plane (xy). In COMSOL Multiphysics, s-polarization is imposed by defining the electric field exclusively along the out-of-plane axis ($E = (0, 0, 1)$). In contrast, p-polarization is implemented using the in-plane wave-vector formulation, where the magnetic field is oriented normal to the computational plane ($H = (0, 0, 1)$). This treatment ensures a physically consistent representation of the polarization states in reduced dimensionality. In addition, within the 3D computational domain, the incident wave is configured to propagate in the x–z plane, which determines the definition of the polarization basis [14]. For s-polarized excitation, the electric field vector is constrained to the y-direction, $E = (0, 1, 0)$, whereas p-polarized illumination is implemented by orienting the magnetic field along the same axis, $H = (0, 1, 0)$. Fig. 3 illustrates in detail how the electromagnetic-field distributions of the two-dimensional and three-dimensional configurations of the gold grating are treated in COMSOL Multiphysics.

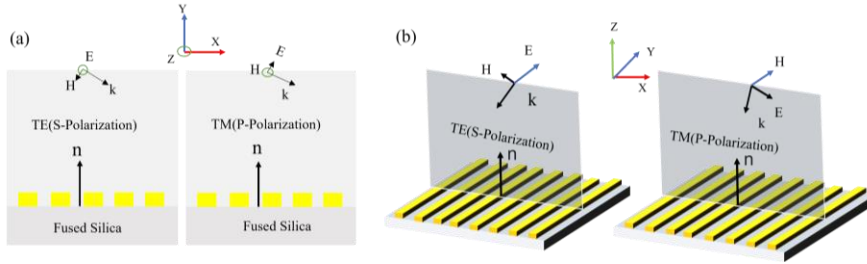


Figure 3. (a) 2D and (b) 3D representations of TE/TM polarization schemes in the grating model

The transient response was simulated using the Drude–Lorentz material model available in COMSOL Multiphysics. Floquet periodic boundary conditions were applied to model the patterned substrate as a single unit cell (Fig. 4(a)), where the fields on opposite boundaries are related through a complex phase factor defined by the transverse component of the incident wavevector. This

treatment greatly reduces the computational cost [15]. A dense mesh was employed for spatial discretization (Fig. 4(b)) to accurately capture the geometrical features and ensure numerical robustness.

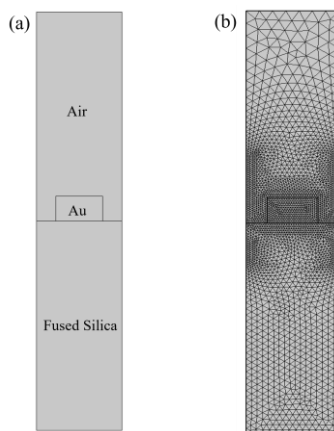


Figure 4. (a) Single unit-cell structure of model and (b) mesh refinement of model

3. Results and discussion

To investigate the polarization response of the Au grating structures and evaluate the reliability of the numerical model, ellipsometric measurements were performed at multiple incident angles and compared with COMSOL simulations. Experimental characterization was performed using an M-2000 spectroscopic ellipsometer, and the measurement configuration is illustrated in Fig. 5. The light source generates a beam that is first linearly polarized by the polarizer, then the polarized beam impinges on the gold grating at an oblique incidence angle, where the interaction with the periodic metallic structure induces wavelength- and angle-dependent polarization changes. The reflected beam then passes through an analyzer that resolves the modified polarization state before reaching the detector [16]. By measuring the reflection-induced changes in amplitude and phase, the ellipsometric parameters Ψ and Δ are extracted. The two values (Ψ , Δ) express the amplitude ratio and phase difference p- and s-polarizations, respectively.

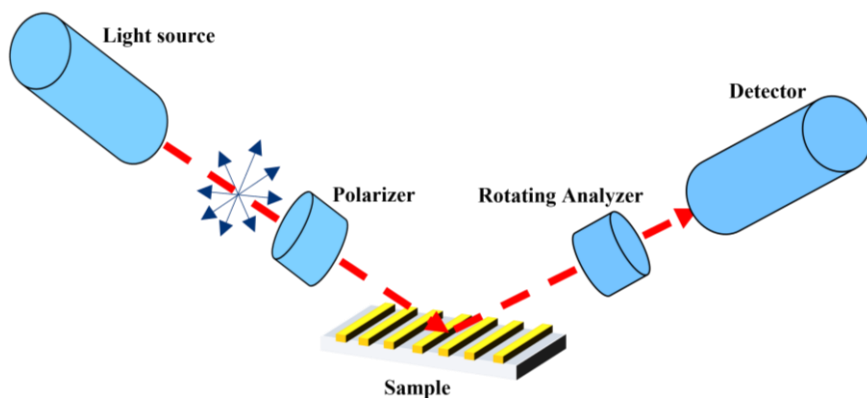


Figure 5. Schematic illustration of the M-2000 ellipsometry measurement on the gold grating

Figs. 6 and 7 show the measured and simulated Ψ and Δ spectra for critical dimensions (CD) of 70 nm and 110 nm, respectively. Overall, the experimental results exhibit a high level of consistency with the simulations, confirming that the geometric and material parameters used in the model are physically reasonable. Meanwhile, certain deviations between simulation and measurement are also observed, reflecting the sensitivity of the ellipsometric response to fabrication imperfections and optical material properties [17]. For the structure with CD= 70 nm, both simulated and experimental Ψ spectra display a pronounced resonance feature in the 450–600 nm wavelength region, which gradually shifts to longer wavelengths as the incident angle increases from 60° to 75° . This behavior indicates angle-dependent coupling of the incident light to guided modes or surface plasmon resonances supported by the subwavelength grating. Although the overall trend is consistent, the measured Ψ amplitude is slightly lower and exhibits smoother oscillations. These differences likely originate from surface roughness, and deviations in the optical constants of the deposited Au film relative to literature values, all of which tend to reduce the resonance strength. The Δ spectra exhibit a characteristic phase jump, particularly prominent around 600–750 nm. Both simulation and experiment capture this feature and its strong dependence on the incident angle, demonstrating that the grating effectively modulates the phase difference between p- and s-polarized components [18].

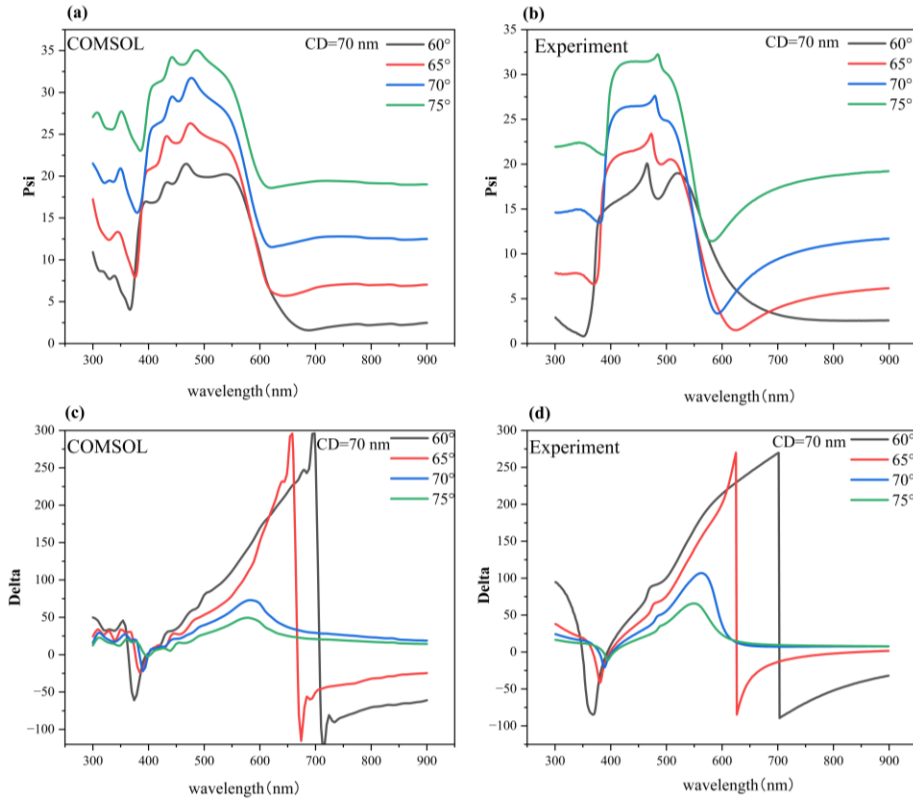


Figure 6. (a) and (b) show FEM simulated and measured Ψ spectra at $\Phi = 60^\circ$; 65° ; 70° ; 75° ; $CD = 70$ nm. (c) and (d) show FEM simulated and measured Δ spectra at $\Phi = 60^\circ$; 65° ; 70° ; 75° , $CD = 70$ nm.

When the CD increases to 110 nm, the optical response undergoes a significant redshift. Both the simulation and experiment reveal that the main Ψ resonance now occurs in the 550–650 nm wavelength region, consistent with the expectation that larger grating features support longer-wavelength coupling conditions. With increasing incident angle, the Ψ peak gradually weakens and broadens, and this trend is consistently reproduced in both datasets. The experimental spectra show a slightly elevated baseline in the short-wavelength region (300–450 nm), which may be related to enhanced scattering and absorption originating from the actual surface morphology of the fabricated grating. And the Δ spectra for $CD = 110$ nm also show a pronounced phase jump, which shifts to longer wavelengths compared to the $CD = 70$ nm case. The simulated Δ exhibits a more abrupt transition, while the experimental transition is broadened and, at high incident angles, exhibits a slight blue shift. The discrepancy is reasonable considering that Δ is particularly sensitive to structural parameters such as grating depth, sidewall slope, and Au dispersion. Even a few nanometers of deviation in

the grating cross-section can measurably influence the phase response, leading to the observed experimental variations[19].

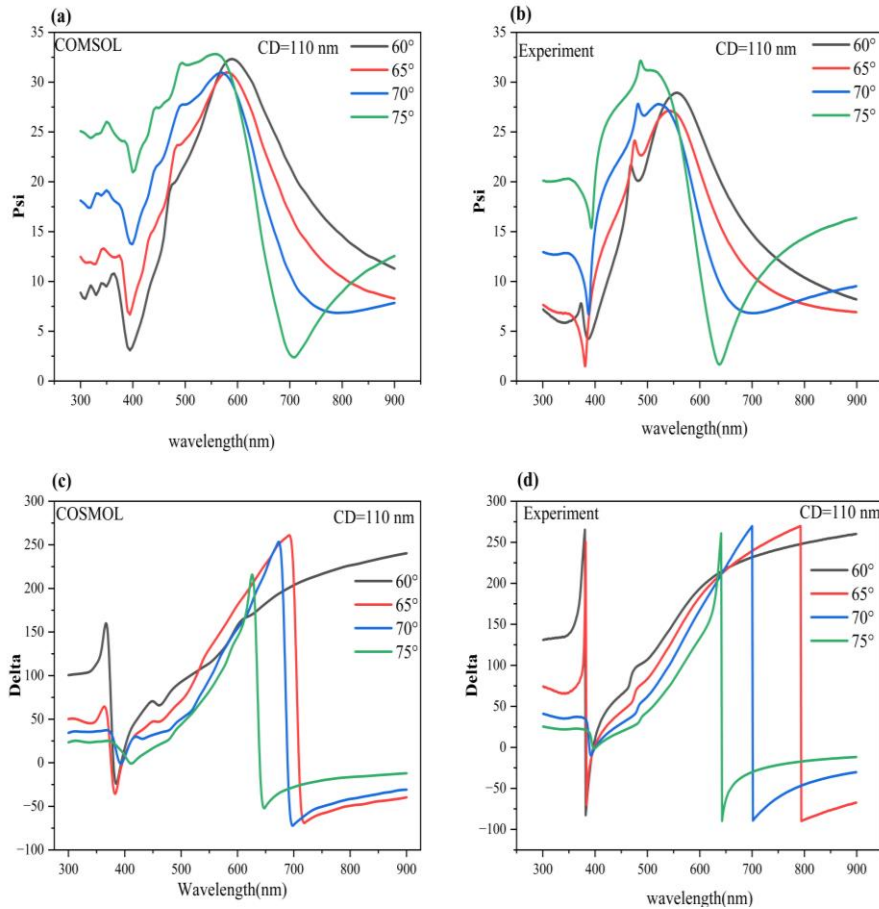


Figure 7. (a) and (b) show FEM simulated and measured Ψ spectra at $\Phi=60^\circ$; 65° ; 70° ; 75° , $CD=110\text{nm}$. (c) and (d) show FEM simulated and measured Δ spectra at $\Phi=60^\circ$; 65° ; 70° ; 75° , $CD=110\text{nm}$.

The near-field distributions (Fig. 8) under s- and p-polarized excitation exhibit fundamentally distinct behaviors arising from the different boundary conditions imposed at the metal–dielectric interface. Under TE (s-polarization) illumination, the electric field remains weakly confined and predominantly distributed within the dielectric region above the grating, forming smooth interference fringes characteristic of diffractive propagation without significant surface coupling [20]. In contrast, TM (p-polarization) excitation generates pronounced field localization at the metal ridge edges and along the grating sidewalls, where the electric-field component normal to the interface efficiently

drives charge oscillations and enables strong coupling to plasmonic-like or guided-mode resonances. This results in sharply confined hotspots with substantially higher $|E|^2$ amplitude and rapid evanescent decay away from the surface. The markedly stronger confinement and resonance-induced enhancement observed for TM illumination directly correlate with the sharper spectral features and phase transitions in the corresponding ellipsometric Ψ and Δ responses, confirming that the dominant optical sensitivity of the grating arises from TE-driven and TM-driven surface-field interactions.

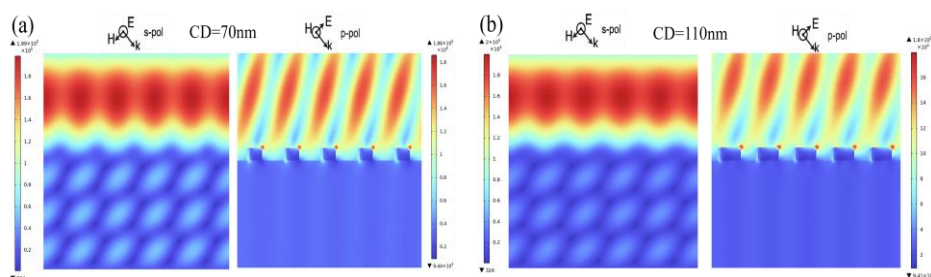


Figure 8. (a) and (b) show the electric field distribution(V/m) maps for TE (s-pol) and TM (p-pol) waves, respectively, extracted for an incident wavelength of 380 nm, for structures with CD values of 70 nm and 110 nm.

4. Conclusions

The validated simulation–experiment workflow confirms that numerical ellipsometry can be reliably applied to guide the design of high-sensitivity plasmonic components. By accurately predicting spectral shifts, resonance strengths, and phase transitions associated with TM-dominant field localization, the method enables rational optimization of grating dimensions, dispersion models, and material choices. These results position the approach as a practical tool for developing next-generation photonic systems including surface-enhanced sensors, integrated optical modulators, and nanoscale spectral filters with improved performance and fabrication tolerance.

Acknowledgements

Support from projects OTKA K-146181, and 20FUN02 POLight are acknowledged. The TKP2021-EGA04 project have been implemented with support from the Ministry of Innovation and Technology of Hungary from the National Research, Development and Innovation Fund.

References

- [1] M. Moharam and T. K. Gaylord, "Rigorous coupled-wave analysis of planar-grating diffraction," *Journal of the Optical Society of America*, vol. 71, no. 7, pp. 811-818, 1981.
- [2] L. Li, "Formulation and comparison of two recursive matrix algorithms for modeling layered diffraction gratings," *Journal of the Optical Society of America A*, vol. 13, no. 5, pp. 1024-1035, 1996.
- [3] N. K. Pavlycheva, "Diffraction gratings for spectral devices," *Journal of Optical Technology*, vol. 89, no. 3, pp. 142-150, 2022.
- [4] T. W. Ebbesen, H. J. Lezec, H. Ghaemi, T. Thio, and P. A. Wolff, "Extraordinary optical transmission through sub-wavelength hole arrays," *Nature*, vol. 391, no. 6668, pp. 667-669, 1998.
- [5] W. L. Barnes, A. Dereux, and T. W. Ebbesen, "Surface plasmon subwavelength optics," *nature*, vol. 424, no. 6950, pp. 824-830, 2003.
- [6] F. Hong and R. Blaikie, "Plasmonic lithography: recent progress," *Advanced Optical Materials*, vol. 7, no. 14, p. 1801653, 2019.
- [7] W.-L. Yeh, C.-M. Fang, and Y.-P. Chiou, "Enhancing LED light extraction by optimizing cavity and waveguide modes in grating structures," *Journal of Display Technology*, vol. 9, no. 5, pp. 359-364, 2013.
- [8] R. Messina, A. Noto, B. Guizal, and M. Antezza, "Radiative heat transfer between metallic gratings using Fourier modal method with adaptive spatial resolution," *Physical Review B*, vol. 95, no. 12, p. 125404, 2017.
- [9] D. Mukherjee, S. Burger, T. Siefke, J. Gour, B. Bodermann, and P. Petrik, "Spectroscopic Ellipsometry of Plasmonic Gratings— Ideal Parameters for Sensing and Subpicometer Measurement Uncertainty," *ACS Omega*, vol. 10, no. 14, pp. 14466-14473, 2025.
- [10] M. Li, S. K. Cushing, and N. Wu, "Plasmon-enhanced optical sensors: a review," *Analyst*, vol. 140, no. 2, pp. 386-406, 2015.
- [11] D. Mukherjee *et al.*, "Optimized sensing on gold nanoparticles created by graded-layer magnetron sputtering and annealing," *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 425, p. 136875, 2025.
- [12] R. Hiramatsu *et al.*, "Three-Method Hybrid Numerical Simulation for Surface-Plasmon-Enhanced GaInN-Based Light-Emitting Diodes with Metal-Embedded Nanostructures," *Frontiers in Physics*, vol. 9, p. 710092, 2021.
- [13] E. Hirose, D. Sakai, A. Iida, Y. Obayashi, and J. Nishikawa, "Exumbrellar surface of jellyfish: a comparative fine structure study with remarks on surface reflectance," *Zoological Science*, vol. 38, no. 2, pp. 170-178, 2021.
- [14] U. Hohenester and A. Trügler, "MNPBEM—A Matlab toolbox for the simulation of plasmonic nanoparticles," *Computer Physics Communications*, vol. 183, no. 2, pp. 370-381, 2012.
- [15] N. M. Lyndin, O. Parriaux, and A. V. Tishchenko, "Modal analysis and suppression of the Fourier modal method instabilities in highly conductive gratings," *Journal of the Optical Society of America A*, vol.

- 24, no. 12, pp. 3781-3788, 2007.
- [16] V. G. Kravets, A. V. Kabashin, W. L. Barnes, and A. N. Grigorenko, "Plasmonic surface lattice resonances: a review of properties and applications," *Chemical Reviews*, vol. 118, no. 12, pp. 5912-5951, 2018.
- [17] P. Urbancova, J. Chylek, P. Hlubina, and D. Pudis, "Guided-mode resonance-based relative humidity sensing employing a planar waveguide structure," *Sensors*, vol. 20, no. 23, p. 6788, 2020.
- [18] M. Kashif, A. A. A. Bakar, N. Arsad, and S. Shaari, "Development of phase detection schemes based on surface plasmon resonance using interferometry," *Sensors*, vol. 14, no. 9, pp. 15914-15938, 2014.
- [19] H. Gross, S. Heidenreich, and M. Bär, "Impact of different stochastic line edge roughness patterns on measurements in scatterometry-a simulation study," *Measurement*, vol. 98, pp. 339-346, 2017.
- [20] A. Sierant, B. R. Jany, and T. Kawalec, "Near-field characterization of surface plasmon polaritons on a nanofabricated transmission structure," *Physical Review B*, vol. 103, no. 16, p. 165433, 2021.

Incidents of Industrial Systems Part 1: Industrial Cybersecurity

Péter Ungvári

Doctoral School on Safety and Security Sciences, Óbuda University, Budapest
ungvari.peter@kvk.uni-obuda.hu
ORCID: 0009-0004-9068-6081

Tibor Wühl

Kandó Kálmán Faculty of Electrical Engineering, Óbuda University, Budapest
wuhrl.tibor@kvk.uni-obuda.hu
ORCID: 0000-0002-7522-3511

Abstract: In the study, design, and maintenance of information system security, knowledge of relevant standards is fundamental. These standards require risk analysis. During risk analysis, incidents are assessed, and attackers are identified. It is useful to categorize incidents when assessing the likelihood of their occurrence and their impact, which facilitates the transparency and management of incidents. Our premise is that there is currently no universally accepted and applied classification system for industrial system incidents and attacks. The first part of our two-part study introduces the topics of industrial security risk management and incident management, laying the foundation for the second part, which delves into the categorization of incidents in more detail. Our goal by the end of the second part is to substantiate the hypothesis with literature sources and explore related causes and possibilities.

Keywords: incident, risk analysis, cybersecurity, safety, industrial automation

Introduction

During the fourth industrial revolution and at the threshold of the fifth, industrial automation systems—as information systems—play a crucial role. Economic competitiveness within an ageing society, under the constraints of a limited workforce and increasing competition, can only be maintained through the use of highly automated cyber-physical systems [1], [2]. Maintaining industrial information systems, however, involves numerous threats and hazards [3], [4].

Security incidents—events causing damage—may result in substantial losses. Such losses range widely: from life-threatening mass disasters, through material damage comparable to the GDP of smaller countries, to slight reductions in the competitive market position of a manufacturing company [5]. To establish and maintain protection against such losses, risk assessment is indispensable, and its application is defined and required by numerous industrial and IT standards [6], [7], [8], [9]. However, it is not always evident how incidents—and, within them, incidents caused by intentional attacks—may be described or handled. The foundation of incident management is categorisation. Based on category definitions, clear procedures and processes can be formulated to mitigate, prevent, or avoid recurrence of incident-related damage.

Introduction to Part 1: Industrial Cybersecurity

Due to digitalisation, an industrial system can only be considered secure if both physical safety and cyber security requirements are met. In cyber-physical systems, data processing and hardware operation are strongly interlinked; consequently, physical safety heavily depends on cyber security. Information security is dynamic, relative, and represents a momentary state. As a result of the activity of threat agents, new hazards and threats appear daily. Exploiting system vulnerabilities, these threats lead to risk, which—acting on assets—results in system exposure [5], [10].

1 Standards of Industrial Security

Physical safety in industrial process control is covered by the IEC 61511 functional safety standard series (Functional safety – Safety instrumented systems for the process industry sector). We refer to this standard series for completeness and due to its fundamental risk-related terminology that also appears in other standards. Such foundational terms include Safety Instrumented System (SIS), Safety Instrumented Function (SIF), and Safety Integrity Level (SIL), representing the degree of risk reduction achieved by a SIF. Implementing a safety instrumented system and achieving certification in accordance with the standard are costly and may not always be feasible for smaller enterprises. Nevertheless, from an educational perspective and for identifying hidden risks, familiarity with the standard is highly beneficial [3].

The general standard for industrial cyber security is ISA / IEC 62443 [11].

2 Acceptable Security Level

IEC 62443-3-2 specifies that the acceptable level of risk, i.e. the Target Security Level (SL-T), must be defined and regularly compared to the Available Security Level (SL-A) and the Current Security Level (SL-C). Determining these security levels requires risk assessment. It is important to assign numerical values to the levels for normative comparison. Table 1 illustrates the individual security levels.

Table 1: Security Levels According to IEC 62443

Security Level	Description
SL4	Protection against sophisticated attacks by groups with extensive resources and strong motivation. These include international criminal organisations, cyber-warfare actors, and the tools and defences associated with them.
SL3	Protection against intentional, targeted attacks. Attackers possess significant resources and motivation.
SL2	Protection against simple, intentional attacks carried out by less motivated attackers with limited knowledge and resources.
SL1	Protection against unintentional damage, such as accidental errors, improper use, configuration mistakes, or unintended information disclosure.
SL0	No protection required or provided. The security of the system is not evaluated. This represents the baseline state and is extremely rare as an acceptable level. Therefore, some sources consider only SL1–SL4.

Based on these descriptions, it becomes straightforward to determine the current level of protection of the examined system (System Under Consideration, SuC) or its components.

The standard provides guidance for assessing these levels through seven Foundational Requirements (FR1–FR7). Through detailed technical analysis of technologies, components, and their documentation, as well as information obtained from vendors and integrators, it becomes possible to evaluate the achievable security level for individual components and the integrated system as a whole under proper operation.

Risk assessment helps identify what risks a system or component may be exposed to. Based on this assessment, the acceptable security level can be defined, in accordance with the given relationships [11].

3 Risk Assessment

To avoid incidents and mitigate damage, security measures must be implemented whose cost (C) is substantially lower than the risk value (R), defined as the cost of damage (D) weighted by the probability of incident occurrence (P). Effective protection reduces risk by an amount greater than the cost of implementing the protection (see Figure 1).

$$R = P * D$$

$$C \ll R$$

$$R - R' > C$$

Figure 1: Inequalities in Risk Assessment

However, risk analysis and risk management must also consider that the organisation must be able to finance the maintenance of protection, and severe consequences—such as threats to human life or significant environmental damage—must be excluded.

Risk assessment and its methodologies are covered in ISO/IEC 27005 and IEC 31010, among others [9], [12].

4 Incident Management

IEC 62443-2-1 addresses planning and procedures for responding to incidents as part of the security lifecycle requirements. The main objectives of incident management are personal safety, protection of physical assets, and maintaining business continuity [11].

Incident management is also addressed independently in ISO/IEC 27035, NIST SP 800-61, and NIST SP 800-171, Section 3.6 [13], [14], [15]. Incident handling in the IEC 62443 industrial cyber security standard does not differ significantly from general cyber security standards. A common feature is that none define incident categories.

Table 2 lists the key steps of incident management according to IEC 62443 [11].

Table 2: Key Steps of Incident Management

Step	Description
Incident Detection	Identification of malicious or operationally harmful security events.
Incident Containment	Actions taken to isolate the incident or limit its propagation.
Incident Analysis	Investigating the cause and extent of the incident to understand how it occurred.
Incident Recovery	Restoring affected systems and processes to normal operation.
Post-Incident Review	Evaluation, lessons learned, and development of additional security measures.

Summary

This article has organised and presented the principal standards and concepts of industrial security, based on scientific sources and the texts of the standards. The individual scholarly contribution lies in highlighting relevant details and drawing new conclusions. We discussed risk assessment and incident management in general terms, identifying the objectives and steps of incident handling, which demonstrated why incident categorisation is valuable. The IEC 62443 standard defines security levels referencing the intent, motivation, and available resources of the threat actor (e.g. attacker). The standard focuses primarily on designing and maintaining secure systems through assessments and protective measures, with less emphasis on incident handling. Thus, it approaches incident-related topics from the direction of risk assessment. Categorising potential incidents can be performed during the assessment of a specific system (SuC), through risk analysis and continuous review. This requires predefined category classes.

References

- [1] M. A. Bär and A. W. Colombo, "Engineering ICPS for Small and Medium Enterprises: A Novel DIN SPEC 91345 Compliant Digitalization Approach," *IEEE Trans. Ind. Cyber-Phys. Syst.*, vol. 1, pp. 307–321, 2023, doi: 10.1109/TICPS.2023.3328840.
- [2] J. Shi, J. Wan, H. Yan, and H. Suo, "A survey of Cyber-Physical Systems," in *2011 International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP)*, 2011, pp. 1–6. doi: 10.1109/WCSP.2011.6096958.
- [3] A. Bicaku, C. Schmittner, P. Rottmann, M. Tauber, and J. Delsing, "Security Safety and Organizational Standard Compliance in Cyber Physical Systems," *Infocommunications J.*, vol. XI, no. 1, pp. 2–9, 2019.
- [4] A. Corallo, M. Lazoi, and M. Lezzi, "Cybersecurity in the context of industry 4.0: A structured classification of critical assets and business impacts," *Comput. Ind.*, vol. 114, p. 103165, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.compind.2019.103165.

- [5] J. P. Kesan and L. Zhang, "Analysis of Cyber Incident Categories Based on Losses," *ACM Trans Manage Inf Syst*, vol. 11, no. 4, p. 25:1-25:28, 0 2020, doi: 10.1145/3418288.
- [6] F. Brancati, D. Mongelli, F. Mariotti, and P. Lollini, "A cybersecurity risk assessment methodology for industrial automation control systems," *Int. J. Inf. Secur.*, vol. 24, no. 2, 2025, doi: 10.1007/s10207-025-00990-9.
- [7] H. L. Hassani, A. Bahnasse, E. Martin, C. Roland, O. Bouattane, and M. E. Mehdi Diouri, "Vulnerability and security risk assessment in a IIoT environment in compliance with standard IEC 62443," *Procedia Comput. Sci.*, vol. 191, pp. 33–40, 2021, doi: 10.1016/j.procs.2021.07.008.
- [8] S. Hollerer, T. Sauter, and W. Kastner, "Risk Assessments Considering Safety, Security, and Their Interdependencies in OT Environments," in *Proceedings of the 17th International Conference on Availability, Reliability and Security*, in ARES '22. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 0 2022, pp. 1–8. doi: 10.1145/3538969.3543814.
- [9] "Risk assessment standards," IEC TC 56. Accessed: Dec. 05, 2023. [Online]. Available: <https://tc56.iec.ch/risk-assessment-standards/>
- [10] "Risk Management Standards," ENISA. Accessed: Dec. 10, 2023. [Online]. Available: <https://www.enisa.europa.eu/publications/risk-management-standards>
- [11] "ISA/IEC 62443 Series of Standards - ISA," isa.org. Accessed: June 01, 2025. [Online]. Available: <https://www.isa.org/standards-and-publications/isa-standards/isa-iec-62443-series-of-standards>
- [12] "ISO/IEC 27005:2022," ISO. Accessed: June 01, 2025. [Online]. Available: <https://www.iso.org/standard/80585.html>
- [13] "ISO/IEC 27035-2:2023," ISO. Accessed: June 01, 2025. [Online]. Available: <https://www.iso.org/standard/78974.html>
- [14] R. Ross and V. Pillitteri, "Protecting controlled unclassified information in nonfederal systems and organizations," National Institute of Standards and Technology (U.S.), Gaithersburg, MD, NIST SP 800-171r3, May 2024. doi: 10.6028/NIST.SP.800-171r3.
- [15] A. Nelson, S. Rekhi, M. Souppaya, and K. Scarfone, "Incident response recommendations and considerations for cybersecurity risk management : a CSF 2.0 community profile," National Institute of Standards and Technology (U.S.), Gaithersburg, MD, NIST SP 800-61r3, Apr. 2025. doi: 10.6028/NIST.SP.800-61r3.

Kisfeszültségű Hálózatok Ívzárlati Veszélyei és Védelme

Morva György, Ujlaki Balázs, Sipos Teodor

Óbudai Egyetem Villamosenergetikai Intézet, Bécsi út 96/B, 1034 Budapest

balazs.ujlaki@energrid.hu, morva.gyorgy@uni-obuda.hu, sipos.teodor@zone-plan.hu

Az épületek és ipari hálózatok elosztó berendezéseinek zárlati áramai folyamatosan emelkednek. Az ún. fémes zárlati áramok szintjei elérhetik a 70-90 kA-es szinteket is. A zárlatok elkerülhetetlen események, ezért a hatalmas szintű zárlatok hatássai ellen hatékony módszereket szükséges kialakítani. A zárlati áramok romboló hatása ellen az „éket ékkel lehet kiütni” módszer a leghatékonyabb, mivel ez képes a szokásos 60-120 msec-os lekapcsolási időt 1-3 msec-re rövidíteni- ami a zárlati pusztítást jelentősen csökkenti. Ez azt jelenti, hogy egy igen gyors háromfázisú zárlatképzővel lesöntöljük a zárlatos főelosztói szint, ezáltal kialszik a zárlati ív. A hatalmas íves jelenség a kezelő személyzetre jelentős veszélyt jelent(hazard). Kialakult egy gyakorlat, amely szerint a zárlati áramok és a megszakítók működési idejének figyelembevételével meghatározzák az ív hőhatását és annak alapján meghatározásra kerül, hogy milyen szintű védőruhában nyithatja ki a kezelő a kapcsoló berendezés szekrényeit. Minden szekrény-ajtóra felkerül egy címke, hogy milyen fokozatú védőruha szükséges.

Kulcsszavak: íves zárlati áramok, égési sérülések, védelem, figyelmeztető jelzések

1 Bevezetés

Az ipari kisfeszültségű hálózatokban ma mára akár 3-4 MVA-es betáplálási transzformátók is jelen vannak, amelyek zárlati áramszintje akár 80-120 kA-es szinteket is elérhet – sőt előfordul azok párhuzamosítása is. Ezen zárlati áramszinteken erősen megnövekszik az ívzárlati áramból eredő kockázat /arc flash hazard/ amely mind a személyzetre, mind a berendezésre és annak környezetére veszélyt jelenthet.

Minden munkadónak fel kell mérni a munkahelyen felmerülő kockázatok szintjét és a megteendő óvintézkedések hatékonyságát. Villamos munkák esetén ez elég összetett feladat. Ennek magában kell foglalnia az összes lehetséges

veszélyforrás megfelelő kezelését. Szokásos hozzáállás, hogy csak az áramütés veszélyére figyelnek, de az ívkisülés ugyanúgy magas szintű kockázatokkal járhat. A villamos munkák kockázatértékelésének egyik eleme, hogy a veszélyeket megfelelően azonosítsák és értékeljék, kezdve a feszültség alatt álló berendezések kialakításával vagy azok közelében végzett munka típusaival.

Ezen cikk egyik fő célja, hogy felhívja a figyelmet a probléma aktualitására és az előrejelző módszerek kidolgozásának szükségességére, valamint számítási módszereket és védelmi eszközöket biztosítson az ívkisülés veszélyének meghatározásához és a megfelelő védekezéshez.

1.1 Az ívzárlati áramok problémája

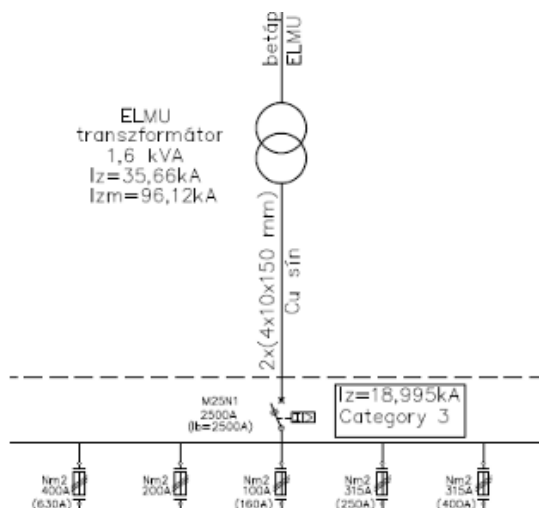
1.1.1 Védelem-tervezés az ipari kiefeszültségű hálózatokban

A villamosenergia-rendszer (VER) egyrészt folyamatosan fejlődik és növekszik. szükségessé vált a villamos szakirányban is felülvizsgálni a sok évtizedeken alkalmazott módszereket.

Így például a villámvédelemben a kockázatkezelés (risk-based) módszerek elterjedése egy műszaki, gazdasági és jogi szükségszerűség volt. A jól bevált hagyományos módszerek, amelyek az épületek típusából és rendeltetéseiből indultak ki – rugalmatlan előírásokat eredményeztek. Ennek következtében jelentős többlet költségek jelentkeztek -ugyanakkor nem biztos hogy kellő szintű védelmet nyújtottak. Nem beszélve arról, hogy adott esetekben nagyobb károk is jelentkezhettek.

A védelmi koordináció szerepe fontos az ipari üzemek kialakításában. Rossz beállítása felesleges lekapcsolásokat, kieséseket idézhet elő, vagy késői működést okozhat. A hazai gyakorlatban sajnos előfordultak ilyenek és hatalmas károk keletkeztek.

Ipari üzemekben az ívzárlati vizsgálatok szempontjából a főelosztó gyűjtősinje a meghatározó elem. az 1. ábrán egy tipikus hazai 0,4 kV-os főkapcsoló egyvonalas rajzát láthatjuk. [1] [2]

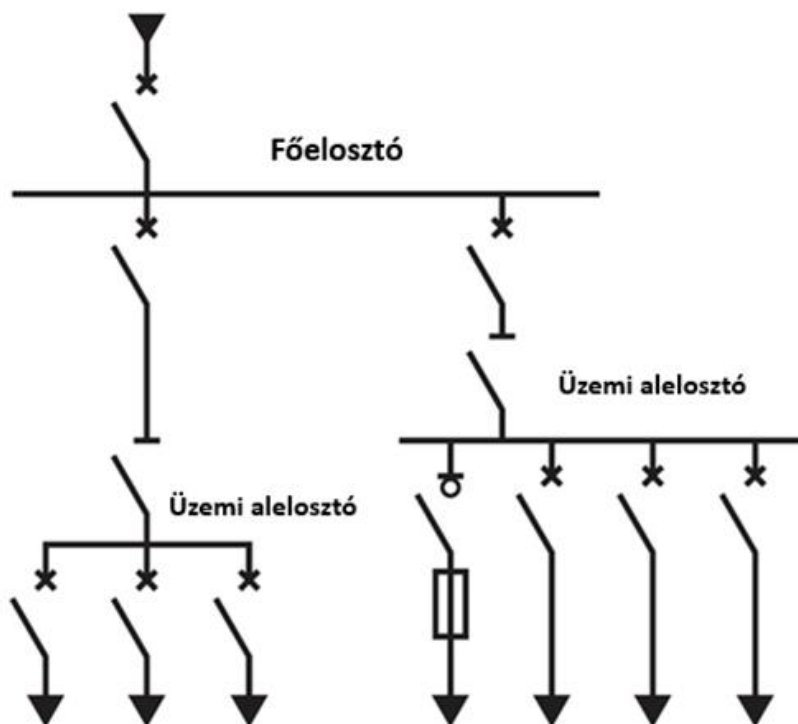


1. ábra tipikus hazai főelosztó

A főelosztó gyűjtősínjének áramát elsősorban a KÖF/KIF transzformátor paraméterei határozzák meg. A hazai gyakorlatban a rövidzárlati reaktancia 4-6%-os tartományban szokott lenni. Ez azt jelenti, hogy a fémes rövidzárlati áram a névleges áram 16-25-se is lehet. Egy 1 MVA-es transzformátor esetében a fémes zárlati áram 30 kA-es szinten szokott lenni. A 10 kV-os mögöttes városi hálózat zárlati teljesítménye 130-150 MVA, így nincs ráhatással a kialakuló zárlati áramokra- akár vehetjük végtelennek is. Az ipari üzemek kialakítása jellemzően sugarasak, tehát a különböző leágazások az előbb említett sínról indulnak. Minden leágazásnak van külön védelme. Túláram védelmeket használunk. Ha ezek a védelemek nincsenek megfelelően beállítva, nem teljesül a szelektivitás követelménye. Ma már a megfelelő koordinációhoz a kapcsoló berendezés függvényében biztosítanak védelmi koordinációt támogató szoftvert – így a Schneider Electric az ECODIAL-t, az ABB a „SOC – Selected Optimized Coordination” és a SIEMENS a SIMARIS szoftver családot.

Az ipari belső hálózatok jellemzően sugaras elrendezésűek (2. ábra). Lényeges hogy a védelmi rendszerben teljesüljön a szelektivitás elve.

A zárlatkorlátozás céljából vagy olvadó biztosítókat alkalmaznak, vagy ma már elterjedt gyakorlat az ún. „kaskádolás” amikor is a főelosztói leágazásokban lévő megszakítók megosztják a zárlati energia (I^2t) terhelést a két készülék között. Ily módon akisteljesítményű kismegszakítók alkalmazhatók nagyobb zárlati áramú hálózatokban. A kaskádolás az koordinált együttműködést jelent egy egy leágazásban. Kaskádolásra pl a Schneider Electric NSX630R, NSX400R vagy az NSX160N alkalmas.



2.ábra Ipari sugaras topológia

1.1.2 A túláram védelmek beállítása

Kisfeszültségen túlterhelés-védelemmel és zárlatvédelemmel egyidejűleg foglalkozunk minden védelem esetében. Olyan védelmi eszközt kell választanunk, amely a saját védelmi funkciójának megfelelő legnagyobb kialakuló áramot megtudja szakítani.[3]

Túlterheléskor az áram nagyobb, mint a névleges érték, ilyenkor a vezetékek és különböző berendezések melegedési szempontból vannak igénybe véve. Elsősorú kockázat a szigetelések minőségének csökkenése.[3]

Jellemző tartománya: $I_n < I_t \leq 10I_n$ I_n : névleges áram I_t : túlterhelési áram [3]

A túlterhelés-védelemnek a következő három feltétel kell kielégítenie:

- $I_B \leq I_n \leq I_Z$ $I_Z \leq 1,45 \cdot I_Z$ $I_{sc} \leq I_{scb}$

I_B : fogyasztó névleges árama

I_n : névleges áram

I_Z : vezeték, kábel terhelhetősége

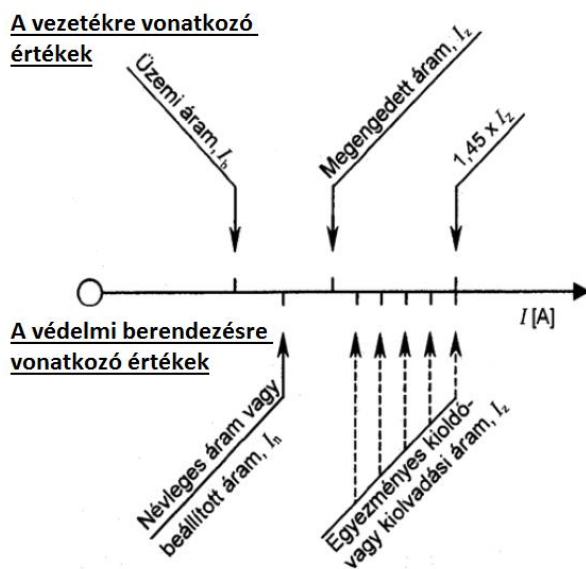
I_2 : egyezményes kioldó, kiolvasztó áram

Értékei a gyakorlatban:

- megszakítóknál: $1,3 \cdot I_n$
- kismegszakítóknál: $1,45 \cdot I_n$
- 16A-nél nagyobb olvadóbiztosítóknál: $1,6 \cdot I_n$

I_{sc} : legnagyobb független zárlati áram

I_{scb} : túláramvédelmi eszköz zárlati megszakítóképessége [3]



3. ábra jellemző értékek [3]

A **zárlati** áramok sokkal nagyobbak, mint az üzemi áram, és mind termikus mind dinamikus igénybevételt jelent a vezetékek és berendezések számára. A zárlat egy

olyan állapot, amikor üzemszerűen különböző potenciálon lévő vezetők egy elhanyagolható értékű impedancián keresztül összeköttetésbe kerülnek.

Jellemző tartománya: $I_z > (15-25)I_n$

I_z : zárlati áram

I_n : névleges áram

Zárlatvédelemkor alapvetően két feltételnek kell teljesülnie:

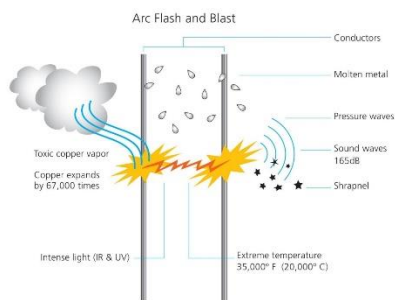
- a megszakítóképességnek nagyobbak kell lennie, mint a beépítés helyén létrejövő legnagyobb független zárlati áram [3]
- a védelmi működés ideje nem haladhatja meg azt az értéket, amely a vezető hőmérsékletét annak megengedhető határa fölé emelné [3]

2 Ívzárlati veszély számítása

Az egységes ívzárlati elemzés szerves része a villamos-biztonságtechnikának, ellentétben a hazai és európai gyakorlattal.

Elsőszámú villamos veszélyek egy üzemben:

- Áramütésveszély (Shock)
- Ív villanás (Arc Flash)
- Ív robbanás (Arc Blast)



4.ábra: Ívzárlat [2]

2.1 Az ívzárlat veszély elemzés menete az IEEE 1584 és az NFPA 70E szerint

Első lépésként az üzem villamos terveit szükséges megismerni. Elemezni kell a védelmi beállításokat. Információval kell bírni a mögöttes hálózat zárlati teljesítményszintekről is. Fontos a bejárás is, amikor meggyőződünk arról, hogy a műszaki dokumentáció és a rendszer megegyezik-e. [4] [5]

Egy megfelelő szoftver segítségével (ez lehet pl. az EasyPower vagy az ETAP) el kell készíteni minden leágazások hálózati képét a kábelek és a berendezések paramétereinek figyelembevételével. A megfelelő zárlati helyek felvétele és a munkavégzési távolságok alapján a szoftver kiszámítja az ívzárlatok mértékét. [4]

A számítások eredményeként megkapjuk az ívzárlati veszély határát(Arc flash boundary, az ívzárlati energiát és a szükséges védőruhát (PPE: Personal Protective Equipment)

Az alkalmazott védőruhák az ívenergia függvényében:

Magyarországon alkalmazott színjelölés	PPE kategória	cal/cm ² határok (45,7 cm munkavégzési távolságon)
	0 (2015-ben már nem szerepel a szabványban)	0 - 1,2
	1	1,2 - 4
	2	4 - 8
	3	8 - 25
	4	25 - 40

Ezen módszer elég egyértelműen meghatározza és szabályozza a feszültség alatt álló berendezések megközelítését és a szükséges védőruházattal szemben támasztott követelményt. Hátránya az, hogy nem ad lehetőséget mérlegelésre és így a különösen a 3-as és 4-es fokozatú ruhák viselése sokkal nehezebbé teszi a munkavégzést.

2.2 Európai ívzárlati kézikönyv

Az európai kézikönyv szerzője Mike Frain – egy gyakorlatias szemléletű útmutatót készített a az ív-villanási problémakör megközelítéséhez. Hasonlóan a villámcsapásoknál alkalmazott kockázat-elemzéshez próbálja keresni az optimális megoldásokat az ívzárlati veszélyek csökkentésére. Most terjedelmi korlátok miatt nem elemezzük az általa az Egyesült Királyságban bevezetett módszereket, de figyelemre méltó eredményeket ért el. [6]

Következtetések

Az ívzárlati veszélyek felmérésénél szerzett tapasztalatok alapján az USA-ban alkalmazott módszer elég egyértelműen meghatározza a teendőket – a kapcsolóberendezés minden tagjára matrica segítségével felkerül, hogy annak megközelítése és ott feszültség alatti munkavégzés mekkora veszélyfokozattal jár és milyen védettségű munkaruhában közelíthető meg.

Jelenleg Európában nincs kialakult gyakorlat, országonként más-más előírások és szokások vannak az ívzárlati problémák kezelésére. Ez a helyzet az esetleges balesetek rendezésére nem nyújt egyértelmű jogi körülményeket sem.

Mindenképpen a kutatás-fejlesztési munkákban célkitűzés lehet a zárlati áramok és a zárlathárításai idők csökkentése már a főelosztókban. A leágazásokban – alelosztókban az olvadó biztosítók és a kaszkádolások lehetővé tehetik az ívzárlati kritikus veszélyek csökkentését.

Irodalom

- [1] OE-KVK Villamos fogyasztók I. / Dr. Kugler Gyula / 2015.10.17
- [2] 4/2013. (X. 16.) MEKH rendelet / 2015.10.17
- [3] Elektromosipari szakemberek kézikönyve
- [4] NFPA 70E - 2015
- [5] IEEE 1584
- [6] The European Arc Flash Guide Mike Frain CEng FIET MCM

Zárlati Áramok Korlátozása Elosztó Hálózatokban

Čonka Zsolt, Morva György, Ujlaki Balázs

Óbudai Egyetem Villamosenergetikai Intézet, Bécsi út 96/B, 1034 Budapest

Conka.zsolt@uni-obuda.hu,

morva.gyorgy@uni-obuda.hu,

balazs.ujlaki@energrid.hu

Tartalmi kivonat: A Villamosenergetikai Intézet az ipari együttműködései során számos kutatás-fejlesztési munkákban foglalkozott már korábban is a hazai villamosenergia-rendszer zárlati problémáival. Jelenleg is folyamatosan különböző formában jelen van a az elosztóhálózatok zárlati- és védelmi problémáinak megoldásában. Jelen munkában nemzetközi kitekintést teszünk az elosztóhálózatok zárlati szint kezelésének vonatkozásában, így a 132 kV-os főelosztó, a középfeszültségű 11 és 22 kV-os hálózatok kérdésében és kitekintünk az ipari 0.4 kV-os hálózatok zárlatkezelési kérdéseire is. Megoldásokat majd további munkákban szeretnénk kapni. A problémákkal kapcsolatban PhD munkát is kívánunk indítani.

Kulcsszavak: körzetesítés; zárlatkorlátozó fojtótekericsautomatikus zárlatkorlátozás; speciális transzformátorok; különleges FCL-ek; trisztor-reaktoros eszközök

1 Bevezetés

1.1 A zárlati áramok problémája

1.1.1 A villamosenergia-rendszer átalakulása

A villamosenergia-rendszer (VER) egyrészt folyamatosan fejlődik és növekszik. Másrészt jelentős átalakuláson megy keresztül.

Az átviteli hálózatokban (220-750 kV) kezdenek megjelenni a nagyfeszültségű egyenáramú átvitelek (HVDC). Továbbá a növekedésnek megfelelően a topológia „sűrűsödik”, növekszik a NAF/NAF állomások száma is.

A 110-160 kV-os un. főelosztói szerepet betöltő hálózatok kvázi – söntölik az átviteli hálózatokat és ez is felvethet problémákat a zárlati áram-növekedésben és az üzemeltetés mikéntjében. A nagymérvű naperőmű elterjedés ma már leginkább a 132 kV-os főelosztóhálózatok időnkénti túlterhelődését okozza.

A középfeszültségű (KÖF) elosztóhálózatokat ellátó transzformátorok egységteljesítményei emelkednek , nagyobb metropoliszokban már 80-120 MVA-es transzformátorokat is telepítenek , amelyek zárlati árama akár a 60 kA-et is elérheti. Ugyanakkor pl. Budapesten a kábelhálózaton 8 kA-es zárlati szint a megengedett érték , míg más metropoliszokban 12-16 kA-ig is elmennek. Egyértelmű , hogy gondoskodni kell kiegészítő zárlati áram korlátozásról.

A kisfeszültségű (KIF) kommunális hálózatokban oszloptranzformátor-állomásokban maximálisan 630 kVA-es teljesítményt alkalmaznak , az épületekben elhelyezett alállomásokban is csak 1 MVA-es teljesítmény fordul elő.

Az ipari KIF hálózatokban viszont akár 3-4 MVA-es KÖF-KIF transzformátok is jelen vannak , amelyek zárlati áramsztintje akár 80-120 kA-es szinteket is elérhet – sőt előfordul azok párhuzamosítása is. Ezen zárlati áramsztinteken erősen megnövekszik az ívzárlati áramból eredő kockázat /arc flash hazard/ amely mind a személyzetre , mind a berendezésre és annak környezetére veszélyt jelenhet.

2 Nagyfeszültségű hálózatok zárlat-korlátozása

2.1 NAF-korlátozás körzetesítéssel és automatikus zárlatkorlátozással

A nagyfeszültségű (NAF) hálózatok (110-500 kV) jellemzően hurkolt kialakításúak és a teljesítményigények növekedésével egyre inkább sűrűbbek és ennek következtében a zárlati áramok szintje folyamatosan növekednek. Ez a folyamat különösen igaz a 110-145kV-os un. főelosztó hálózatokra , amelyek egy-egy nagyváros vagy ipari körzetben kritikus szintű zárlati áramok megjelenésével jár. Így például nálunk Budapest térsége , de már Debrecenben is kezd megjelenni hasonló probléma.

Nálunk először a 80-es években kezdtek foglalkozni ezen problémákkal [1]. Az időben jelentek meg olyan fogalmak , mint a körzetesítés és az automatikus zárlatkorlátozás. Az akkori legerjedtebb 120 kV-os megszakítók az OTKF 40001-es megszakítók 20 kA-es áramokat tudtak kezelni. de már akkor is megjelentek nagyobb áramsztintek.

A körzetesítés jelenleg is létező megoldás – Budapesten jelenleg a 132 kV-os főelosztóhálózat három körzetre van bontva , annak ellenére, hogy megjelentek az

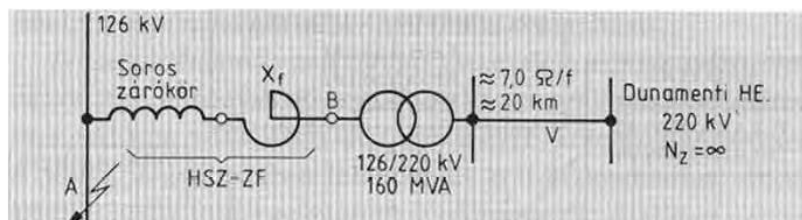
SF6-os nagyobb áramú megszakítók is (30 és 40 kA) . Ezek kialakítása a gyűjtő sín összekötő megszakítók kikapcsolt állapotban tartásával történik a megfelelő 132/10 kV-os alállomásokban. Az un. automatikus zárlati korlátozás – ami lényegében egy kaszkádolás jellegű beavatkozás már nincs jelen a hazai gyakorlatban, amikor is először működött a gyűjtő sín összefogó készülék, majd a zárlatos leágazás megszakítója.

2.2 NAF-korlátozás zárlatkorlátozó fojtótekerccsekkel

A nemzetközi gyakorlatban még megtaláljuk a zárlatkorlátozó fojtótekerccset (ZKF) is. Hazai szinten a 90-es évek közepén merült fel ZKF-ek telepítése az Albertfalvai 220/120 kV-os alállomás térségében, ahol is a zárlati áramok szintje már meghaladta a 30 kA-t. [2,3] a hálózat lazítása hatékony eszköz ugyan, de de egyidejűleg csökkenti az üzembiztonságot és növeli a veszteségeket.

A zárlati viszonyokat még tovább rontja , hogy a hazai 132 kV-os hálózatokban az X_0/X_1 -viszony akár 0.4-0.6 is lehet , ami azt is jelenti egyben, hogy az $I^{FN} > 1.2 \cdot I^{3F}$. Ezen probléma jelen van különböző mértékben gyakorlatilag az összes 132 kV-os hálózatban. Az FN-zárlati áramok kompenzálására a NARF/132 kV-os transzformátorok csillagpontjába 12-16 ohmos reaktorok kerülnek, míg a 132/KÖF transzformátorok csillagpontjába 2200 ohmos ellenállások. Ily módon az FN-zárlati áramok akár 7-9%-al csökkenthetők. A csillagpont-lazítások viszont generálhatnak egy sor problémát – így megnövekedhet a megszakítók visszatérő feszültsége, és védelmi-irányítástechnikai problémák is keletkezhetnek.

Az ELMŰ területén jelenleg is működik a hangfrekvenciás központi vezérlés (HFKV) 1980 óta, 132 kV-os csatolásokkal. ezért szükség volt a fölöttes alaphálózat felé hangfrekvenciás zárókörok beépítésére , amelyek a 216.6 Hz-es jelek jobb terjedési viszonyait biztosítják. Ugyanezek egyidejűleg hozzájárulnak a zárlati áram korlátozásához is. Lehetséges a két rendszer egybeépítése is 1. ábra



1. ábra

A mintegy 20 éve végzett számítások vizsgálatai – megítélésem szerint- jelenleg is aktuálisak és feltehetően szükséges lesz alkalmazásuk a jövőben is.

A külföldi gyakorlatokban is aktuális probléma lett a zárlati áramok korlátozása a 110kV és magasabb feszültségű hálózatokban. Ugyanakkor vannak kísérletek speciális ultragyors működésű un. IS-Limiter alkalmazására, amelyek néhány

milisecundum alatt működhetnek. De jól kialakult irányelvek és gyakorlat még hiányzik [2-3].

2.3 A lehetséges fejlesztési irányok

A NAF főelosztóhálózatokban a zárlati áramok szintje további emelkedése várható. Ugyanakkor a körzetesítés rontja az üzembiztonságot és növeli a hálózati veszteséget.

Jelenleg ezen hálózatok alállomásai optikai hálózaton keresztül össze vannak kötve így lehetőség van egy-egy terület – pl. a budapesti régióban egy olyan átfogó központi vezérlőrendszer kiépítésére, amelyik lehetővé teszi a körzetek egyesítését és csak a zárlat bekövetkezés esetében bontja a hálózatot a megfelelő helyeken.

3 Középfeszültségű hálózatok zárlat-korlátozása

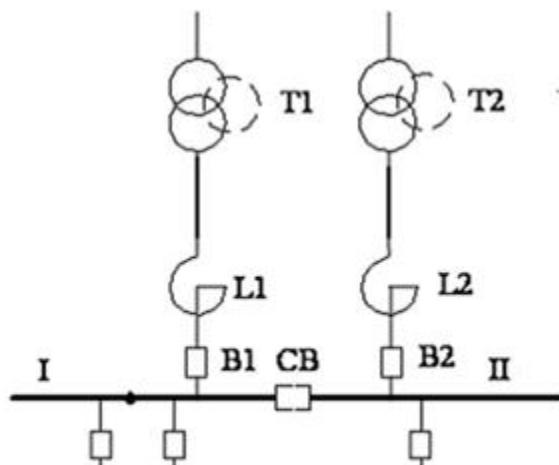
3.1 Hagyományos megoldások

Hazai szinten a középfeszültségen a zárlati korlátozást a transzformátor-teljesítmény korlátozásával oldják meg. A legnagyobb teljesítmény, ami beépítésre kerül a 40 MVA, ami 10 kA-es zárlati szintet jelent. De a legelterjedtebb teljesítményszint a 25 MVA-es transzformátor, amelynek zárlati árama 6.5 kA.

A 11 kV-os városi kábelhálózatokban már most is találunk 63 mVA-es transzformátorokat, amelyek zárlati árama eléri a 33 kA-t, ugyan akkor a megengedett zárlati áram 8 kA. A városi hálózatok zárlatkorlátozása kiemelt jelentőségű.

3.1.1 Központi reaktorral történő zárlatkorlátozás

A reaktor egy ferromágneses mag nélküli induktortekercs. A dinamikus erőhatások miatt érdekében a tekercs kerete betonnal van kitöltve, innen ered a "betonreaktor" elnevezés. A reaktor fő paramétere az induktív reaktancia X_f , amelyet a katalógusokban általában ohmban adnak meg. A reaktor induktív reaktanciája növeli az elektromos hálózat teljes ellenállását az energiaellátó rendszer és a rövidzárlati pont között, ami a rövidzárlati áram csökkenéséhez vezet.



2. ábra – központi reaktoros korlátozás

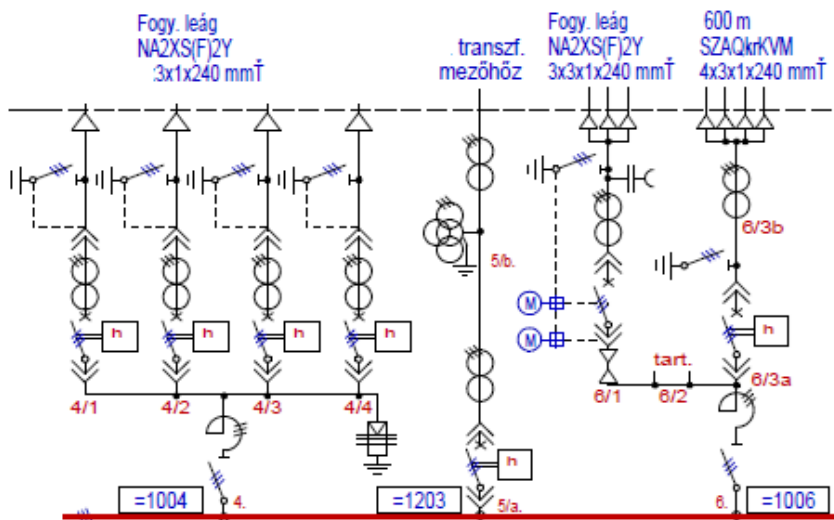
Az 2.ábrán látható megoldás jelentős feszültségeséssel jár, ezért ez ebben a formában a hazai hálózatokban nem került alkalmazásra.

Ennek a megoldásnak az alternatívája a nyújtott droppal rendelkező transzformátorral történő korlátozás. Ez a megoldás megjelent a hazai gyakorlatban – igaz maximum 31.MVA-ig működik 18%-os drop mellett [4].

Ezen két megoldás gazdaságos és a 10 kV-os gyűjtősín igénybevétele is már korlátozott zárlati áram-szinten történik csak, de a feszültség-minőség nehezen biztosítható. A két sínfél üzemszerűen külön működik.

3.1.2 Csoportos fojtózással történő zárlatkorlátozás

A rövidzárlati áramok korlátozása érdekében hálózati fojtótekercecsek telepíthetők a gyűjtősínre is. Az ilyen fojtótekercecsek nemcsak a rövidzárlati áramot korlátozzák, hanem növelik az alállomási gyűjtősínek maradékfeszültségét is a mögöttük lévő rövidzárlatok során. Ez a megoldás az alállomás építés költség-emelkedéséhez vezet. Jelenleg ez a legelterjedtebben alkalmazott hazai megoldás - csoportos fojtózásnak nevezzük (3.ábra).



3. ábra csoportos fojtózás

3.1.3 Ikerfojtós zárlati áram korlátozás

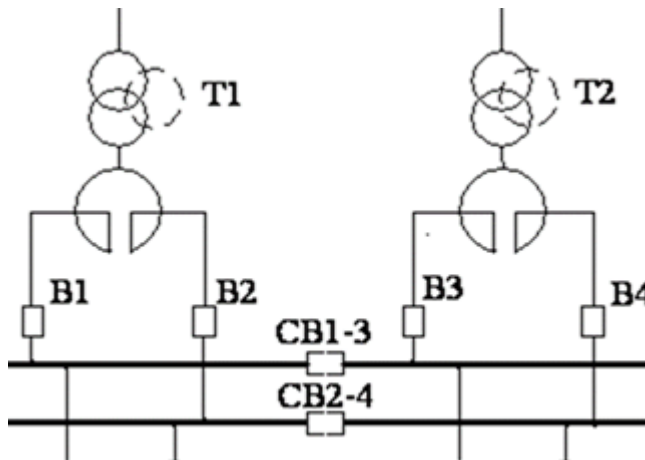
Normál üzemi körülmények között a feszültségvesztések csökkentése érdekében egyetlen reaktor helyett kettős reaktorokat is lehet alkalmazni. Ezeket a reaktorokat szabványos reaktorként tervezik, középponti leágazással.

Az ikerreaktorok két előnnyel járnak. Először is, lehetővé teszik négy gyűjtőszakaszhelyezését egy 6(10) kV-os technológiai kapcsolóberendezésben. Továbbá, az ikerfojtók ágainak ellenállása az ágakban folyó áramok irányától és nagyságától függ. Normál üzemben, amikor minden reaktorágon közel azonos terhelő áram folyik, az ágakban folyó áramok a középpontból ellentétes irányokba irányulnak, és nagyságuk hasonló. Az ellentétes áramok kölcsönös indukciója miatt az egyes reaktorágak induktív reaktanciája a felére csökken.

Egy 6(10) kV-os hálózatban fellépő rövidzárlat során a kettős reaktor ágaiban folyó áramok ugyanabba az irányba folynak; az egyik ágban az áram a reaktor középpontjától a gyűjtősinig folyik (a rendszerből érkező rövidzárlati áram), a másik ágban pedig a gyűjtősinéktől a reaktor középpontjáiig (az EM-ből érkező betáplálási áram). Ha a reaktorágakban folyó áramok megközelítőleg azonos nagyságúak, akkor a reaktorágak mindegyikének induktív reaktanciája körülbelül 1,5-szeresére nő a katalógusadatokban megadott névleges ellenállásához képest. Így normál körülmények között a kettős reaktor mindegyik ágának ellenállása a névleges ellenállás fele, és a 6(10) kV-os gyűjtőszakaszok egyikén fellépő rövidzárlat esetén háromszorosára nő. Ugyanakkor a normál üzemmódban a

feszültségveszteségek az egyetlen reaktorhoz képest a felére csökkennek, és a rövidzárlati áram 1,5-szeresére korlátozottabb.

A rövidzárlati áramok korlátozását iker-fojtók és a 6(10) kV-os sínek négy szakaszra osztása segítségével az 4. ábra mutatja:

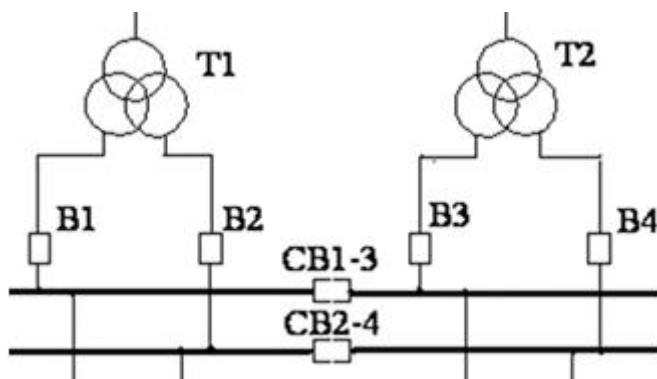


4. ábra. Ikerfojtós zárlati korlátozás

A villamosenergia-rendszer felőli rövidzárlati áram korlátozása mellett az ikerfojtók a többi gyűjtősínszakasz betáplálási áramait is korlátozzák a rövidzárlati ponton. Az egyik szakasz villamos motorjainak betáplálási árama egy másik szakaszban fellépő rövidzárlat esetén a fojtótekercs mindkét ágán átfolyik.

3.14 Osztott szekunder tekercsű transzformátorok alkalmazása

25 MVA és nagyobb névleges teljesítményű transzformátorok esetében széles körben alkalmazzák az osztott szekunder tekercselésű transzformátorokat a rövidzárlati áramok korlátozására a gyűjtősín-szakaszok egyenletes terhelése esetén (5. ábra).



5. ábra osztott tekercselésű transzformátoros kialakítás

Az osztott tekercselésű transzformátorokban minden egyes szekunder feszültségű tekercs teljesítménye a transzformátor névleges teljesítményének a fele. Minden egyes szekunder feszültségű tekercs ellenállása kétszerese az azonos teljesítményű kététekercses transzformátor ellenállásának. A transzformátor zárlati áramokkal szembeni ellenállása körülbelül 1,8-1,9-szeresére nő egy azonos teljesítményű kététekercses transzformátorhoz képest. Így lényegében megoldódik a zárlati korlátozás és a feszültségviszonyok sem romlanak le.

Következtetések

A NAF főelosztó-hálózatokban megfontolás tárgyává kellene olyan átfogó automatikai rendszer kialakítását, amely megszüntetné a körzetesítés alkalmazását. Ezzel növekedne az üzembiztonság és csökkenne a hálózati veszteség.

A közép-feszültségű városi kábelhálózatokban a jelenlegi csoportos-fojtózású megoldás a feszültség-viszonyok szempontjából optimális, de magas költségigényű. Az elkezdett ún. nyújtott droppal működő transzformátoros betáplálás gazdaságos – de csak 31 MVA-ig alkalmazható és a feszültséggel szemben támasztott minőségi elvárások nem teljesíthetők.

Az osztott tekercselésű transzformátorokkal megépített alállomások gazdaságosak és a feszültség minőség is megfelelő.

Irodalom

- [1] Dr. Bendes Tibor, Dr.Tombor Antal,Hatvani György,Morva György „Villamos hálózatok létesítése és üzemvitele” 1983.KKVMF-jegyzet
- [2] Dr.Miháلكovics Tibor, Németh János „Zárlati áramok csökkentésének lehetősége soros fojtótekercsek alkalmazásával az ELMŰ Rt. 120 kV-os főelosztóhálózatán I. rész Elektrotechnika 1995/12 száma
- [3] Dr.Miháلكovics Tibor, Németh János „Zárlati áramok csökkentésének lehetősége soros fojtótekercsek alkalmazásával az ELMŰ Rt. 120 kV-os főelosztóhálózatán II. rész Elektrotechnika 1996/01 száma
- [4] Alexander Octavianus Surya, Langlang Gumilar,Arya Kusumawardana, „Increase in High Impedance Value of Transformer to Reduce Short Circuit Fault Currents in High Voltage Networks” 2022 11th Electrical Power, Electronics, Communications, Controls and Informatics Seminar (EECCIS)
- [5] Terence Hazel „Limiting Short-circuit Currents in Medium-voltage Applications” Electrical Engineering portal-EEP 2020
- [6] Ilyushin P.V., Komandenko A.V. Efficiency of Methods and Tools for Limiting and Controlling Short-circuit Currents in Distribution Grids with Distributed Generation Facilities" 2021 NAUKA

Duzzasztás nélküli, úszó vízienergia-hasznosító (DNÚVH) berendezések védelme

Jakab István

egyetemi tanársegéd, doktorandusz

Óbudai Egyetem

Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar

Elektronikai és Kommunikációs Rendszerek Intézet

Műszertechnikai és Automatizálási Tanszék

1084 Bp. Tavaszmező u. 17. B ép. 115.

Tel.: +36-1-666-5178

Fax.: +36-1-666-5169

E-mail: jakab.istvan@uni-obuda.hu

Óbudai Egyetem

Biztonságtudományi Doktori Iskola

1081 Budapest, Népszínház u. 8.

Tel.: +36-1-666-5375

Absztrakt: Most a XXI. század elején, a szomszédos orosz-ukrán konfliktus rávilágít az energiaellátás sebezhetőségére és a diverzifikáció szükségességére. Sajnálatos módon a század bővelkedik fejlesztést igénylő, a meglévő energiahálózat bővítésére, kiegészítésére irányuló, annak biztonságát növelését kényszerítő hatással. Elég, csak a gázellátási problémára gondolni. De az is elgondolkodtató, hogy a konfliktus során a támadó fél taktikai csapásai a másik fél energetikai központjaira, energiatermelő erőműveire energiatovábbító hálózatára koncentrálódik a másik fél megbénítása céljából. Ennek bizonyítására a háború mozzanataiból kiragadtam az idevonatkozó eseményeket, megemlíttem az az éghajlat és időjárás változás okozta hatásokat. Felsoroltam a megújuló energiaforrásokat és leírtam jellemző tulajdonságaikat. Összeszedtem a vízienergia-művek mint kritikus infrastruktúra elemek védelmének kijelölésének jogszabályi előírásait. Összehasonlítottam és értékeltem a duzzasztásos vízierőművek és a DNÚVH védelmét. Összeszedtem a vízierőműveket érő lehetséges támadások módozatait illetve javasoltam ezek kivédésére teendő válaszle lépéseket.

kulcsszavak: biztonságtechnika, vízi-erőmű, kritikus infrastruktúravédelem

1. A történelmi előzmények

Cikkem a vízi energia felhasználás, szerintem méltatlanul mellőzött, duzzasztás nélküli vízienergia hasznosítás védelmi kérdéseivel foglalkozik.

De hogyan és mivel kerülhető el az időjárásfüggő, ingadozó energiatermelés!

Erre példa az ókor csúcstechnológiájának számító vízikerekes úszómalom volt. Ez a szerkezet (malomhajó) úszott a vízen és kiküszöbölte a folyók olykor nagy vízállás és szállított vízmennyiség változását.

A téma előzményével bővebben a 2023. évi XXXIX. Kandó konferenciára írt előadásomban: „**Az egy kihalt mesterség - A Vízimolnárok**” címűben foglalkoztam. (1)

1.1 Az innovációt kényszerítő vagy sürgető hatások

Az orosz-ukrán konfliktus hibrid hadviselésének csak jelképesen kiragadott néhány mozzanata, amely a kritikus infrastruktúrát sújtotta:

- 2022. február 24-25-én az orosz erők is elfoglalták a csernobili atomerőmű területét, majd 2022. április 2-án kivonultak. (2)
- 2022. március 5-én az orosz erők elfoglalták a zaporizsjai atomerőművet. (2)
- 2022. ősz a balti-tengeri orosz gázvezetékek elleni támadások. (2)
- 2022. október Krími hídrobbantás egy 21 tonna robbanóanyagot szállító teherautóval. (2)
- 2023. június 6 gátrobbantás okozta árvíz Herszonban. (2)
- 2023. jún. felrobbant a Togliatti-Odessza ammóniavezeték a Harkov régióban (2)
- 2023. július a Krími hídrobbantás 750 kg-os robbanóanyagot szállító tengeri drónnal. (2)
- 2024. október elején károk keletkeztek az Észtországot Finnországgal összekötő Balticconnector nevű gázvezetéken, illetve távközlési kábeleken. (2)
- 2024. november megrongálták a Finnországot Németországgal összekötő, tengerfenéken futó Cínia C-LionI nevű vezetéket. (2)
- 2024. december egy szervezett csoport terepmegfigyeléseket végzett gáz- és kőolajvezetékek környékén Szlovákiában, és Magyarországon. (2)
- 2025. január az orosz gáznak az ukrainai gáztranzit leállítására. (2)
- 2025. január a Török Áramlat gázvezetéknek a Krasznodari területen lévő Ruszkaja kompresszorállomás infrastruktúráját ért dróntámadás. (2)

- 2025. februárban 14.-én dróntámadás érte a csernobili atomerőművet, ami károkat okozott a szarkofág burkolatában. (2)
- 2025. június 6-án ukrán dróntámadások Engelsben a Kristall stratégiai olajtároló, Michurinszkben pedig a Progressz hadiipari üzem ellen. (2)
- 2025. július 7-én ukrán drónok találták el a dél-oroszországi Ilsky olajfinomítót. (2)
- 2025. július 29-én ukrán dróntámadás miatt kigyulladt egy üzemanyag-szállító katonai tehervonat a szalszki vasútállomáson. (2)
- 2025. augusztus 2-án egy ukrán dróntámadást követően a novokuibisevski finomító teljesen felfüggesztette működését. (2)
- 2025. augusztus 10-én egy ukrán dróntámadást követően a szaratovi olajfinomító létesítménye állította le a kitermelést, míg a rjazanyi finomító felére mérsékelte termelését. (2)
- 2025. augusztus 11-én ukrán dróntámadás az orenburgi héliumgyárra. (2)
- 2025. augusztus 13-án támadás a Transznyeft Barátság kőolajvezeték szivattyú állomása ellen az oroszországi Brjanszki területen lévő Uniecsa városában. (2)
- 2025. augusztus 14-én éjjel a volgográdi régióban dróntámadás ért egy olajfinomítót. (2)
- 2025. augusztus 14-én támadást hajtottak végre a Kaszpi-tenger partján található Olja kikötője ellen. (2)
- 2025. augusztus 18-án támadás a Barátság-kőolajvezeték ellen. (2)
- 2025. augusztus 22-én támadás érte a Barátság-kőolajvezeték az orosz–belorusz határnál. (2)
- 2025. augusztus 24-én ukrán drónok támadása következtében csökkent a dél-oroszországi kurszki atomerőmű teljesítménye, valamint tűz keletkezett az észak-oroszországi Uszty-Luga üzemanyag-exportáló kikötői termináljában. (2)

A fentiek közül csak egy eseményt ragadnék ki részletesebben a 2023. június 6.-én a Dnyeper folyón lévő Nova Kahovka gát felrobbantását, amely megmutatja, hogy egy 312 MW (2) beépített teljesítményű duzzasztott rendszer mennyire sérülékeny háborús időszakban. Csak ez a vízierőmű a hazai duzzasztásos vízienergia majdnem hatszorosa!

Mint látjuk az összes hibrid hadviselés egyfelől az utánpótlás, az energiaellátás, az összes kritikus infrastruktúra elleni támadás, a háborús konfliktus kiszélesedését, eskalációját okozza, másfelől a konfliktusban még nem álló felek belépését is eredményezheti. Az európai embereket ezen kívül a háborús következmények is sújthatják, valamint a migráció növekedése, a szankciók és az ár- és energiahiány miatti áremelkedések.

1.2 Az éghajlati, vagy időjárásváltozás ami a kritikus infrastruktúrát sújtotta:

- 2018-ban a rekordnak számító aszályos időjárás miatt a Budapesten a Kvassay zsilip és vízierőmű működése akadozott, és így nem tudott elegendő vizet juttatni a Soroksári–Duna ágba, veszélyeztetve a környék mezőgazdaságát ezen belül is a növénytermelést, valamint az ipari víz ellátását, és a közlekedést. (3)
- Az alacsony vízállás és melegedő Duna vize miatt a Paksi Atomerőmű hűtővízhiánnyal küszködött és vissza kellett a reaktorokat szabályozni. (2)

Mindezek sürgetően követelik új, és innovatív energiaforrások kifejlesztését, a megújuló energiaforrások jobb kihasználása érdekében.

2 Milyen fő megújuló energiaforrásokkal rendelkezik Magyarország:

- Napenergia, (viszonylag a legkisebb befektetésű, de napszakonként és évszakonként ingadozó)
- szélenergia, (hely és időjárásfüggő, ingadozó)
- vízi energia, (időjárásfüggő, ingadozó)
- geotermikus energia. (nehezen hozzáférhető, terület és domborzatfüggő,
- megújuló szén alapú energia (időjárásfüggő, és széndioxidot termel).

Mint látjuk minden megújuló energiaforrás, a geotermikus energia kivételével, vagy időjárás, vagy napszak, vagy évszak függő és ingadozó termelt energiát szolgáltat, azonban a vízkerekes vízienergiatermelő berendezés viszonylag könnyen kiküszöböli akár a hirtelen változó időjárásból fakadó vízmennyiség változást az úszóképességének köszönhetően.

Természetesen a teljes vízhiány kivételével.

Automatizmus segítségével a folyóvíz áramlási sebességét is kompenzálni tudja.

3 A vízienergia-művek mint kritikus infrastruktúra elemek védelmének kijelölésének jogszabályi előírásai

- Az EU-s jogszabály: 2008. december 8-i [2008/114/EK tanácsi irányelv](#) (*ECI Irányelv*) (4)

- hazai implementációja a: [2012. évi CLXVI. törvénnyel](#) a létfontosságú rendszerek és létesítmények azonosításáról, kijelöléséről és védelméről (a továbbiakban: *Lrtv.*) (5)
- valamint a Lrtv. végrehajtásáról szóló: 65/2013. (III.8.) Korm.rendelet ([Lrtv. Vhr.](#)) (6)
- valamint további ágazati bontásban, az energia ágazatra vonatkozó: [374/2020. \(VII. 30.\) Korm. rendelet](#) (7)

4 A vízikerekes vízi energiatermelő berendezés védelmi összehasonlítása a jelenleg Magyarországon szinte egyeduralkodó duzzasztásos rendszerekkel.

Duzzasztásos erőművek és teljesítményük:

- Kiskörei vízerőmű - 28 MW (10)
- Tiszalöki vízerőmű - 12,9 MW (6)
- Kesznyéteni vízerőmű - 4,4 MW (4)
- Ikervári vízerőmű - 2,28 MW (11)
- Békésszentandrás-duzzasztó - 2 MW (12)
- Kenyeri vízerőmű - 1,54 MW (13)
- Gibárti vízerőmű - 1 MW (14)
- Csörötneki vízerőmű - 485 kW (15)
- Körmendi vízerőmű - 240 kW (16)
- Alsószőlnöki vízerőmű - 200 kW (17)
- Pornóapáti vízerőmű - 113 kW (18)
- Szentpéterfai vízerőmű - 50 kW (18)
- Kvassay szivattyútelep és vízerőmű (csupán időszakosan termel áramot) (19)
- Sió zsilip vízerőmű, Keselyűs (20)
- Szentgotthárd vízerőmű (21)

A hagyományos vízierőművek összesen tehát 53,2 MW villamos energia termelésére képesek, az utolsó három ideiglenes és elhanyagolható teljesítményű nélkül.

Telepített (nem úszó) vízikerekes erőművek, amelyek vízfolyás mellé épített malmokból lettek átalakítva áramtermelő erőművé, a vízfolyás elnevezésével jelölve:

- Gyöngyös-patakon,
- Pinkán,
- Kis-Rábán,
- Répcén,
- Lajtán,
- Sédén.

Ezek az erőművek tehát nem tekinthetők DNÚVH-nak mivel a folyóvizek partjára vannak telepítve. A víz mozgását hasznosítják, de annak sebességét és mindenkorai vízszintet nem tudják automatikusan követni, szabályozni.

5 A vízierőművek védelmi összehasonlítása

	Duzzasztásos vízierőmű	DNÚVH
5.1.1 Központosítottság és védelem szerint:	Centralizált, ezért egy drón támadással szemben is védeni szükséges, mert akár a védműveken ejtett legkisebb sérülés is az egész erőmű és a környék pusztulását eredményezheti.	Decentralizált, ezért nehéz és költséges egy drónnal vagy egy álcázott művelettel az egész pontonflottát megsemmisíteni, vagy működésképtelenné tenni.
5.1.2 Álcázási lehetőség szerint:	Álcázni más tereptárgynak nehéz, védelme mind élőerőben, mind technikában költséges.	Kikötőpontonnak hatásosan álcázható.
5.1.3 Szabályzás, működtetés, szerint:	Szabályzás ez erőműben történik, nem lehet az egyik pillanatról a másikra leállítani, a lökésszerű változás tönkre teheti az erőművet.	Szabályozni az erőművet a központi irányító, felügyelő, és ellenőrző helyről lehet, de saját magát is automatikusan leállíthatja, akár egy fordulat alatt is.
5.1.4 Kiváltás szerint:	Kiváltani a termelés kiesést az adottságok miatt nehézkes.	Tartalék egység esetén rövid egy napon belül tartalékkal pótolható.

5.1.5 Elhelyezkedés szerint:	A duzzasztásos vízierőmű csak bizonyos vízesés felett (kis-, közepes-, nagy esésű) érdemes telepíteni. Ehhez a folyót gátak közé kell szorítani, a vizet az elérendő teljesítményhez védművekkel duzzasztani szükséges. Helyhez kötött.	Az elhelyezésükhöz kiépített partműveket igényel, beton, vagy kövezett part, hajócsövek, kikötőbak. Szükség szerint más helyre vontathatók.
5.1.6 Javítás, csere szerint:	A turbinát vagy generátort csak részleges vagy teljes lezárással lehet a rendszerből kiemelni, javítani, cserélni.	Az ponton szükség szerint eltávolítható, javítóhelyre vontatható, de kisebb javítások helyszínen is végrehajtható.
5.1.7 Uszadék, hordalék és jég elleni védelem szerint	Mind a három tényező jelentősen károsíthatja és védelmi szempontból is jelentős. Ezért állandó karbantartást igényel: uszadék eltávolítással, kotrással és jégtöréssel.	Mind a három tényező jelentősen károsíthatja és védelmi szempontból is jelentős. Ezért állandó karbantartást igényel: uszadék eltávolítással, kotrással. Saját jégtelenítővel van ellátva.
5.1.8 Az energia termelésben betöltött szerepe, szerint	Ha a Bösi erőművet vesszük alapul, akkor Szlovákia energia termelésének tizede hiányozna.	Egy egység kiesése, elhanyagolható hányadban módosíthatja az energia termelést.
5.1.9 Személyzet igénye szerint:	Kiemelt tudású szakember gárdát igényel az üzemeltetés.	képzett mérnök üzemeltetők, szerelők és vontatóhajó személyzet
5.1.10 Hajóforgalom szerint:	A duzzasztás miatt zsilipelni kell	A hajóforgalom számára akár kikötő ponton is lehet

6 Az erőművek védelmi értékelése

Az általam teljesen szubjektíven meghatározott 0-tól 10-ig terjedő skálán mozgó értéke az 5.1-es táblázat soraiban szereplő tulajdonságoknak:

sorok száma	Duzzasztásos vízierőmű	DNÚVH

5.1.1 Központosítottság és védelem szerint:	2	7
5.1.2 Álcázási lehetőség szerint:	1	5
5.1.3 Szabályzás, működtetés, szerint:	6	8
5.1.4 Kiváltás szerint:	5	7
5.1.5 Elhelyezkedés szerint:	2	7
5.1.6 Javítás, csere szerint:	5	7
5.1.7 Uszadék, hordalék és jég elleni védelem szerint	7	8
5.1.8 Az energia termelésben betöltött szerepe, szerint	5	9
5.1.9 Személyzet igénye szerint:	10	7
5.1.10 Hajóforgalom szerint:	2	5
5.1.11 Támadó megközelíthetőség szerint	2	2
5.2 minősítés összesen	47	72

6.1 Az értékelés összesítése

A fenti táblázatok (még egyszer hangsúlyozva szubjektív) értékelése alapján a duzzasztásos vízierőművek védelmi színvonala az összesen 110 pont felét sem érték el. Ezzel szemben viszonylag jól szerepelt az úszó vízikerekes erőmű.

Az előzőek alapján elmondható, hogy a pontonra szerelt úszó vízikerekes erőmű kompakt, teljesen automatizálható, igény szerint bővíthető, vagy pótolható. Központilag kamerákkal ellenőrizhető, működésébe be lehet avatkozni.

Szabályzásához képzett mérnökök, karbantartásához és működés fenntartásához képzett szerelőszemélyzet, valamint mozgatásához vontatóhajó és legénység szükséges.

Jól álcázható, és védhető, illetve pótolható.

Mivel mind a kettő hajózó útvonalba esik, ezért mind a kettő ki van téve álcázott támadásoknak, eltérés csak annyi, hogy a kritikus infrastruktúra elleni támadás mekkora kárt tud tenni az energiatermelés egészében.

7 A DNÚVH rendszereket érő támadások lehetséges módozatai

A jelenlegi orosz-ukrán konfliktusból kiindulva lehetséges támadási lehetőségek a kritikus infrastruktúra ellen nem teljes, csupán példászerű csoportosítása.

7.1 távolból indított nagysebességű rakéta támadás

7.1.1 föld-föld,

7.1.2 levegő-föld.

7.2 távolból indított vezető nélküli drón

7.2.1 hajó drón,

7.2.2 légi drón.

7.3 álcázott hajó.

7.3.1 kereskedelmi,

7.3.2 turista,

7.3.3 kutató hajónak álcázott.

7.4 személyek, csoportok.

7.4.1 turistának álcázott,

7.4.2 belső személy,

7.4.3 belső személynek (örnek, szerelőnek) álcázott

Bármelyik módozatot választja a támadó fél, általában a cél megközelítésben nincs nehéz dolga, hiszen nyílt vízben megközelíthető, nincs többvonalas védekezési rendszerrel körbe kerítve. A hagyományos vízierőművek több kilométeres gátrendszerrel rendelkeznek, amelyek a duzzasztást végzik, valamint a zsilipek és a hajózási útvonal is támadási felületet nyújtanak. Az úszó vízikerekes erőmű is nyílt hajózási útvonal mentén vannak telepítve, előnyük talán csak annyi, hogy az első támadás után a továbbiak minimalizálhatók, illetve gazdaságilag nem éri meg egyenként semlegesíteni, megtámadni.

Támadás esetén a „verébre nem lövünk ágyúval” mondás a mai napig érvényes. Ha más példát vennék, akkor is a vezér illetve a bástya támadása a sakk alapvetése, ha a király mattolása a cél. A többi figura sem elhanyagolható, de nem ez a végcél.

Ha megvizsgáljuk a cikkem 2.1. pontjának harmadik bekezdésében felsorolt gátrobbantást, (nem vizsgálva az elkövető fél kérdését) a végcél a kritikus infrastruktúra elleni támadás volt. Minimális támadási befektetéssel, maximális eredmény elérése.

8 A DNÚVH rendszereket érő támadások elleni általam javasolt védelem

Az előző pontban részletezett támadások közül a 7.1-7.2 gyakorlatilag csak légvédelemmel védhető, de gazdaságilag többbe kerül a védelem, mint a védendő cél cseréje.

- 8.1 A 7.3-as pontban leírt támadás megghiúsítása katonai felderítéssel, illetve a gyanús, és veszélyt jelentő hajók nyomon követéssel előzhető meg. Katonailag biztosított révkalauzok alkalmazásával is megoldható a biztonság növelése.**
- 8.2 A 7.4 pontba foglalt személyek támadási célú távoltartása a következő:**
- 8.3 A turistának álcázott személyek ellen, vagy csoportot katonai felderítéssel jelzett és nyomon követés, tiltott területtől elzárás, kamerával megfigyelés, mozgás és területvédelem.**
- 8.4 A belső személy szabotázsza ellen belső átvilágítás, és minden, ami a fegyveres testületeknél alkalmazott szűréssel azonos.**
- 8.5 A belső személynek (őrnek, szerelőnek) álcázottak ellen, hamisíthatatlan többlépcsős azonosító RFID-val ellátni, vagy ezzel egyező retina, újljenyomat azonosítás és védelem.**
- 8.6 7. pontban mellőzött vezérlő, és szabályzó központot érő támadás ellen védett, álcázott helyre telepíteni, és hamisíthatatlan többlépcsős azonosító RFID-val ellátni, vagy ezzel egyező retina, újljenyomat azonosítás és védelem.**

Ezeket a védelmi lépcsőket időről-időre folyamatosan karbantartani, ellenőrizni, felülvizsgálni kötelező.

A cikket főleg az 5.- 6.-7.-8. pontban leírtak és annak szubjektív megítélése miatt vitaindítónak számom.

Irodalomjegyzék

- [1] Egy kihalt mesterség - Vízimolnárok. István, Jakab. XXXIX KANDÓ KONFERENCIA : ÓBUDAI EGYETEM KANDÓ KÁLMÁN KAR, 2024.
- [2] origo.hu. origo.hu/keresés. [Online] 2025 . január 10. [Hivatkozva: 2025. január 10.] <https://www.origo.hu/>.
- [3] ORIGO. origo.hu. [Online] 2023. november 14. [Hivatkozva: 2025. január 10.]
- [4] Jogszabálytár, Nemzeti. Nemzeti Jogszabálytár. Nemzeti Jogszabálytár. [Online] 2013. március 08. [Hivatkozva: 2024. december 20.] <https://njt.hu/jogszabaly/2013-65-20-22.12>.
- [5] Nemzeti Jogszabálytár. Nemzeti Jogszabálytár. [Online] 2012. június 30. [Hivatkozva: 2024. december 20.] <https://njt.hu/jogszabaly/2012-166-00-00.12>.

- [6] Nemzeti Jogszabálytár. Nemzeti Jogszabálytár. [Online] 2020. július 30. [Hivatkozva: 2025. december 20.] <https://njt.hu/jogszabaly/2020-374-20-22>.
- [7] Nemzeti Jogszabálytár. Nemzeti Jogszabálytár. [Online] 2023. július 01. [Hivatkozva: 2025. 12 20.] <https://njt.hu/jogszabaly/2020-374-20-22>.
- [8] Vízügyi honlap. [Online] 2010. április 19. [Hivatkozva: 2025. január 10.] <https://www.vizugy.hu/index.php?module=content&programelemid=45>.
- [9] Vízierőmű, Tiszalöki. TiszavízVízierőmű Kft. TiszavízVízierőmű Kft. [Online] [Hivatkozva: 2025. január 10.] https://web.archive.org/web/20160820002617/http://www.tiszavizvizeromu.hu/index_elemei/tiszalokadatok.htm#.
- [10] HERNÁDVÍZ. Kesznyéteni Vízierőmű. Kesznyéteni Vízierőmű. [Online] [Hivatkozva: 2025. január 10.] <https://www.hernadviz.hu/kesznyeten.html>.
- [11] ZÖLDTECH. zoldtech.hu. [Online] 2009. 09 29. [Hivatkozva: 2025. 01 10.] <https://web.archive.org/web/20120205222622/http://zoldtech.hu/cikkek/20050929ikervar>.
- [12] zoldtech.hu. [Online] 2013. szeptember 13. [Hivatkozva: 2025. 01 10.]
- [13] Vízierőmű, Kenyeri. kenyeri vizieromu.hu. [Online] [Hivatkozva: 2025. január 10.] <https://kenyerivizeromu.hu/>.
- [14] gibárt.hu. *gibarti vizierőmű*. [Online] [Hivatkozva: 2025. január 10.] <https://web.archive.org/web/20180618204452/http://encs.varosom.hu/latnivalok/muemlekek/Gibarti-Vizeromu.html>.
- [15] vizugy.hu. *vizugy.hu*. [Online] [Hivatkozva: 2025. január 10.] <https://www.vizugy.hu/index.php?module=content&programelemid=41&id=43&page=2>.
- [16] vizugy.hu. *vizugy.hu*. [Online] 2009. augusztus 08. [Hivatkozva: 2025. január 10.]
- [17] vizugy.hu. *vizugy.hu*. [Online] [Hivatkozva: 2025. 01 10.] <https://www.vizugy.hu/index.php?module=content&programelemid=41&id=43&page=2>.
- [18] nyuduvizig.hu. *vízérőhasznosítás*. [Online] [Hivatkozva: 2025. január 10.] <https://www.nyuduvizig.hu/nyugat-dunantuli/vizgazdalkodas-vizszolgaltatas/vizrendezes/vizerohasznositas>.
- [19] ovf.hu. *ovf.hu*. [Online] [Hivatkozva: 2025. január 10.] <http://kvassay.szivattyutelep.ovf.hu/>.

[20] Vizügyi Honlap. *vizugy.hu*. [Online] [Hivatkozva: 2025. január 10.] <https://www.vizugy.hu/?mapModule=OpGrafikon&AllomasVOA=164961E2-97AB-11D4-BB62-00508BA24287&mapData=Idosor>.

[21] **Emil, Lendvai.** szentgotthrd.hu. *kiemelt hírek*. [Online] 2017. június 13. [Hivatkozva: 2025. január 10.] <https://szentgotthard.hu/hu/kiemelt-hirek/atadtak-a-szentgotthardi-kis-vizeromuvet.html>.

Egy kihalt mesterség 3. rész – A vízimolnárok további szerszámai

Szerző: Jakab István egyetemi tanársegéd

Óbudai Egyetem
Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar
Elektronikai és Kommunikációs Rendszerek Intézet
Műszertechnikai és Automatizálási Tanszék

1084 Bp. Tavaszmező u. 17., B ép. 115.

Tel.: +36-1-666-5178

Fax.: +36-1-666-5169

E-mail: jakab.istvan@uni-obuda.hu

Absztrakt: A mostani előadásom előzményei a 2023. évi XXXIX. Kandó konferenciára írt „Egy kihalt mesterség – A vízimolnárok” (István, 2023), és a 2024. évi XL. Kandó konferenciára írt „Egy kihalt mesterség 2. rész – A vízimolnárok szerszámai” (István, 2024) cikkeim folytatásaként a mostani cikkem a vízimolnárok további szerszámairól szól. Az előzmény cikkben a molnármesterek munkájához szükséges úszómalom-hajó vázának elkészítéséig és a vízikerek tengely beállításáig jutottam el. Mint azt már az előző cikkemben is írtam a vízimolnárok a malmukat és annak berendezését, szerszámaikat több generációra tervezték, sőt nem csak tartósnak, de a fő részeire szétszerelhetőnek is kellett lennie, mivel az úszó malomhajót télire Szent András napja után, jégmentes helyre, vagy szárazra kellett vontatni.

kulcsszavak: eszközök, vízimolnár, ipartörténelem

A vízikerék



I. ábra az újjáépített Ráckevei Hajómalom (Ráckevei Hajómalom, 2022)
(<http://hajomalom.rackeve.hu/>) (Hajómalom, dátum nélkül.)



II. ábra az eredeti Ráckevei Hajómalom (Ráckevei Hajómalom, képgyűjtemény) (ismeretlen, 2024)



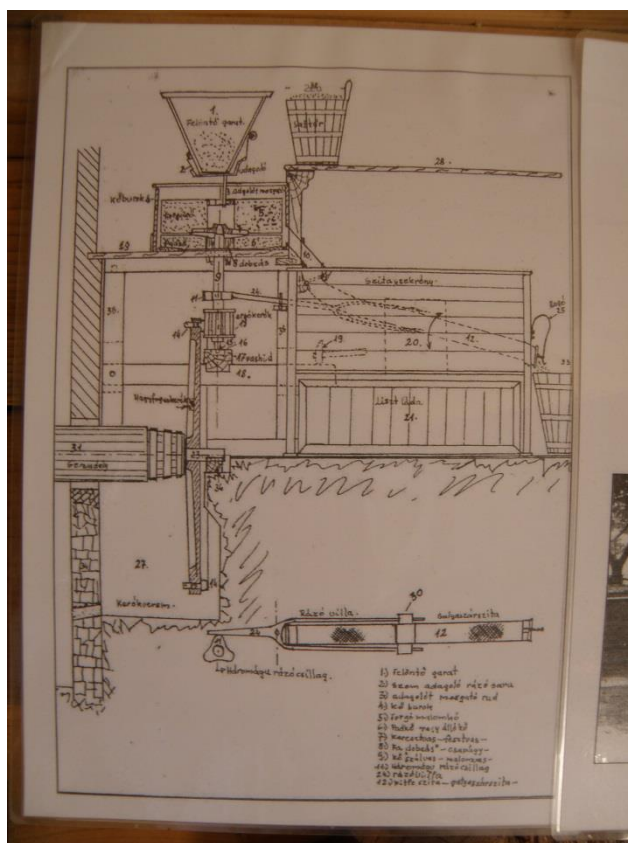
III. ábra az eredeti Ráckevei Hajómalom (Ráckevei Hajómalom, 2022) (<http://hajomalom.rackeve.hu/>) (ismeretlen, dátum nélk.)

Az előző képeken is jól látszik, hogy az eredeti hajómalom és az újjáépített hajómalom vízikerek tengelyén két osztatban voltak felszerelve a lapátok. Miért így tervezték és kivitelezték az egykori malomépítők?

A válasz egyszerű, mert a lapátokat a vízhozamtól függően szerelni kellett a lapátok számát csökkenteni, vagy növelni. Az úszó vízimalom egyedüli áramlási energia szabályzási lehetősége a lapátszám változtatásban valósult meg. Egy hat méter hosszú lapát esetén, már a deszkák mérete miatt is nehéz a megmunkálása, szerelése. A szerelés az összekötő hídról történt.

1 A belső berendezések

A vízikerek után, a hajómalom belső berendezéseinek az elkészítése következett. A berendezésekhez az akkori asztalos és kőmegmunkálási technikák csúcsát kellett ismerni.



IV. ábra hagyományos malomkőes hajómalom őrlőberendezése
(Ráckevei Hajómalom, képgyűjtemény) (ismeretlen, dátum nélk.)

A képen két fő berendezés látható az álló és a forgóköveket tartalmazó őrlőjárat és a szitaszekrény.

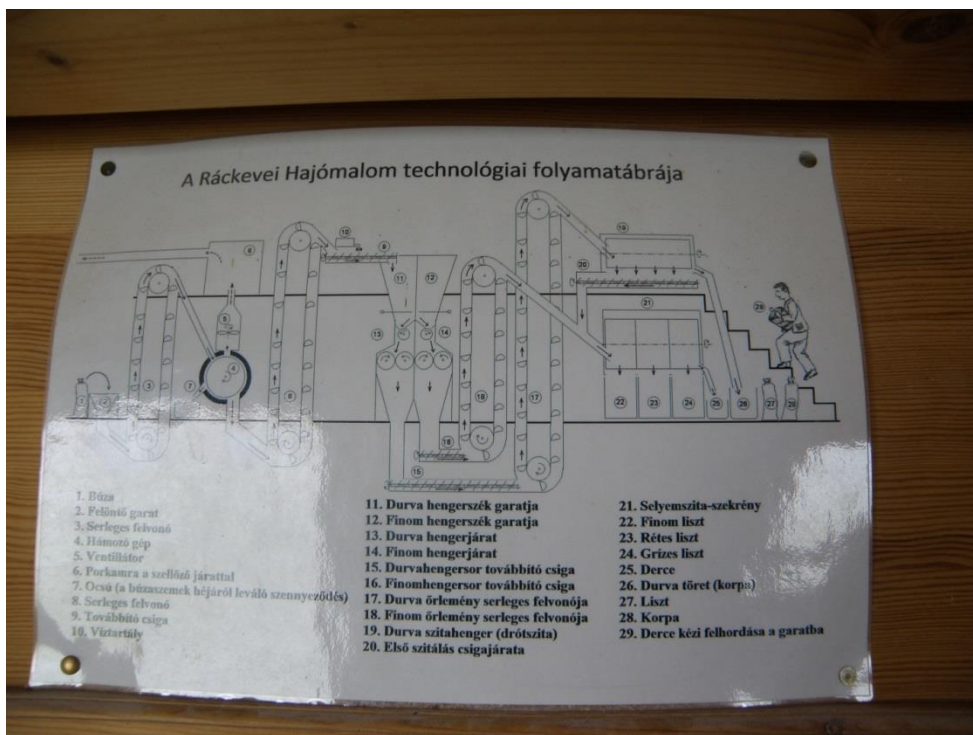
A már hántolt gabonát beleöntötték a garatba, majd onnan az adagolón keresztül beömlött a felső forgó és alsó állókövek közé, ott megőrlődött. Az őrlőjáratból csúszdán került a szitaszekrényben lévő gatyaszitába.

A liszt a lisztládába gyűlt alul, a szitán fennmaradó pedig oldalt egy edénybe került, amit vagy visszaöntöttek a garatba, vagy eladták búzatőretnek.

A hagyományos malomkőes őrlőberendezés, mint az addig alkalmazott összes őrlőberendezés sajátossága, hogy az őrlőkő finom pora is belekerült a lisztbe. Ezért az őrlött búzából készült kenyér mindennapos fogyasztása a fogak kopásához, elvadásához vezetett. Innen ered a vásott (haszontalan) köllök kifejezésünk is.

A hagyományos őrlőköves hajómalom őrlőköveit kezdetben Franciaországból vásárolták a hajómalom készítésekor. A tömböt hasították, méretre nagyolták, átmérőre faragták, átfúrták közepén, majd finom felületűre csiszolták, végül hornyolták és a megfogáshoz és rögzítéshez helyeket képeztek ki rajta.

Az alsó álló és a felső forgókő nem csak az utolsó lépésben tértek el, hanem a vastagság és az átmérő is minden úszómalomnál egyéni volt.



V. ábra A ráckevei hajómalom őrlőberendezése (Ráckevei Hajómalom, képgyűjtemény) (ismeretlen, dátum nélkül.)

Ezen a képen egy modernebb hengersizékes hajómalom belső berendezése látható.

Az ábrán három fő rész látható, a hántoló az őrlőhengersizékek és a szitaszekrény.

Ez a berendezés sokkal kifinomultabb és bonyolultabb, mint az őrlőköves berendezés. Fogaskerekekkel meghajtott két hengersizékes őrlő berendezéssel. Több szíjhajtású serleges felvonóval, továbbító csigával, szitahengerrel és szitakerettel, őrlőmennytárolóval rendelkezik.

Ennél az őrlő is többféle elkülönített lett, mint a finomliszt, rétes liszt, gríz, derce, és az első lépésként egy menetben megtörtént a gabona hántása is.

3 A kőmegmunkálás



VI. ábra. Vésők (saját szerszámról készült saját fotó)



VII. ábra. Kalapácsok (saját szerszámról készült saját fotó) (István, dátum nélk.)

A tömböket vésőkkel és kalapáccsal hasították, kerekítették, nagyolták.

A munkához kiválóan kellett ismerni a különböző kőfajtákat, a megmunkálási fogásokat (kőrögzítés, egyenletes felfekvő felület), a kőhibák elhelyezkedését.



VIII. ábra. Kővágó csákány (Ráckevei Hajómalom, szerszámgyűjtemény) (István, 2024)

A kövek finom megmunkálásához az ábrán középen látható kővágó csákányt használtak. Minden finom művelethez ez volt az elterjedt.

Amint beindultak a hazai malomkő bányák, már rendelhetek is a megfelelő méretre készített és lovas-kocsival helybe szállított köveket.

4 Emelő szerkezetek



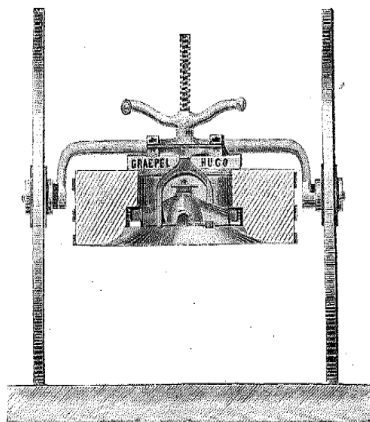
VIII. ábra. Hévér (Ráckevei Hajómalom, szerszám)



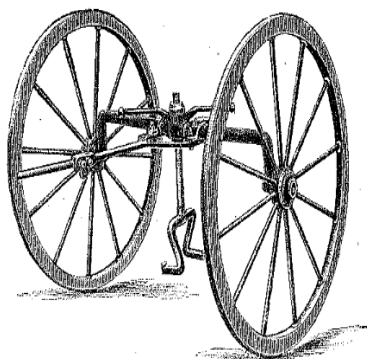
IX. ábra. csigás emelő (Ráckevei Hajómalom, szerszám) (István, 2024)

A nehezebb berendezési tárgyak, helyére illesztéséhez (például: a vízikerek tengelye), a felső képen látható hévért, vagy az alsó képen látható köteles csigasort használtak.

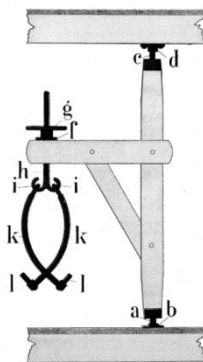
A következő berendezésekkel eredetben soha nem találkoztam, azokat csak a Malomkövek című könyvből ismerem. Éppen ezért, érdemes néhány rajzot bemutatni és ismertetni.



X. ábra. kocsis daru (Malomkövek) (Pozdoray János, Péntes István, Sebők Tibor, Csiffáry Gergely, Hála József, 2023)



XI. ábra. kocsis daru (Malomkövek) (Pozdoray János, Péntes István, Sebők Tibor, Csiffáry Gergely, Hála József, 2023)



XII. ábra. fa daru (Malomkövek) (Pozdoray János, Péntes István, Sebők Tíbor, Csiffáry Gergely, Hála József, 2023)

A nehéz malomköveket különféle darukkal mozgatták, emelték ki, illetve be az őrlőjáratba.

Ezek a daruk a mai portál és bakdaruk ősei voltak, de igen jó szolgálatot tettek a szét- és összeszerelés, beállítás, szintezés, illetve a kőcserélés és kőjavítás során.

Az őrlőkövekhez azok belső furatán, illetve külső palástján csatlakoztak.

Források:

- [1] Egy kihalt mesterség – A vízimolnárok. István, Jakab. KANDÓ KONFERENCIA : OE KANDÓ, 2023.
- [2] Egy kihalt mesterség 2. rész – A vízimolnárok szerszámai. István, Jakab. KANDÓ KONFERENCIA : OE KANDÓ, 2024.
- [3] Hajómalom, Ráckevei. újjáépített Ráckevei Hajómalom.
- [4] ismeretlen. eredeti Ráckevei Hajómalom. [Online] 2024.
- [5] <http://hajomalom.rackeve.hu>. [Online] <http://hajomalom.rackeve.hu>.
- [6] hagyományos malomkőves hajómalom rajz.
- [7] A ráckevei hajómalom őrlőberendezése rajz.
- [8] István, Jakab. szerszámok képek.
- [9] RÁCKEVEI Hajómalom szerszámkép. 2024.
- [10] Pozdoray János, Péntes István, Sebők Tíbor, Csiffáry Gergely, Hála József. Malomkövek. Szentendre : SCOPE Translations nyelvi szolgáltató Kft., Palattia Nyomda és Kiadó Kft., 2023.

Nagytávolságú pont-pont vízfelszíni kapcsolat LoRa alapon

Molnár Zsolt, Braun Ferenc

Molnár Zsolt, Óbudai Egyetem, Bécsi út 96/B, 1034, Budapest,
molnar.zsolt@kvk.uni-obuda.hu

Braun Ferenc, HUN-REN Energiatudományi Kutatóközpont, Konkoly-Thege
Miklós út 29-33, 1121, Budapest, braun.ferenc@ek.hun-ren.hu

A LoRaWAN technológia alkalmazása az utóbbi években széleskörűvé vált. A megoldás fizikai rétegét a LoRa modulációs technológia adja. Ez a szűrt spektrumú, alacsony energiaigényű és alacsony adatsebességű kommunikáció kiváló lehetőséget biztosít pont-pont kapcsolat megvalósítására is, ha egyedi protokoll épül rá. Előadásunkban bemutatunk egy pont-pont kapcsolatra készült protokollt, amelyet mára már két környezetben is használnak. Az egyik környezet egy vasútvágasszal és gépészettel sűrűn beépített, több emelet magas színpadi és színpad mögötti terület, amelyen más moduláció illetve protokoll nem volt képes az adatátvitelt megvalósítani. A másik környezetben az aktuátorokat működtető végpont a tenger felszínéhez nagyon közel helyezkedik el, a másik végpont pedig a tengerparton. Ebben az esetben vizsgálnunk kellett a moduláció használhatóságát és hatótávolságát. Bemutatjuk és röviden elemezzük az előzetes mérési eredményeinket, amelyek hazai vizeken születtek, majd ugyanezt tesszük a felhasználás helyén felvett adatsorozattal is.

Kulcsszavak: LoRa, pont-pont kapcsolat, vízfelszíni hullámterjedés, tengeri környezet, vezeték nélküli kommunikáció, nagytávolságú kapcsolat

1 Bevezetés

A megoldandó feladat tengerfelszínen mozgó, nagysebességű objektummal való magas megbízhatóságú kommunikáció. A tengeri jármű a parton elhelyezett állás 3 km-es sugarú körében mozog. A vevőantenna a víz felszínétől csupán néhányszor 10 cm-re van, de az adóantenna árbocra is helyezhető. Az adatforgalomnak kétirányúnak kell lennie, de az adatmennyiség csekély (néhány bájt).

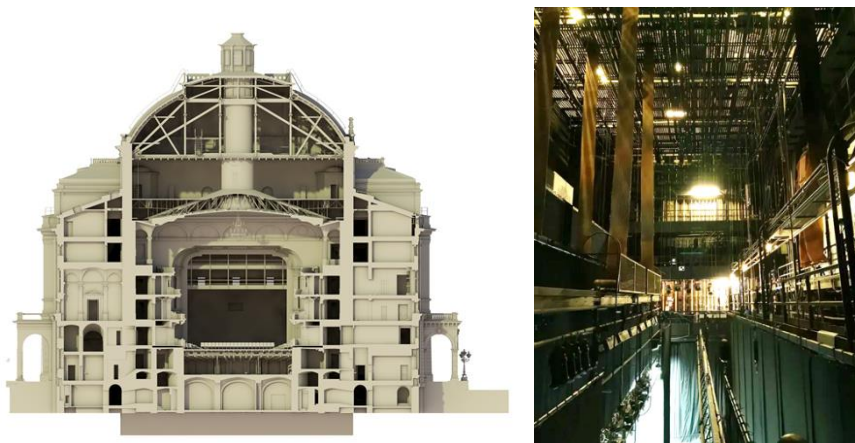
A cikkben nem az elektronikára, illetve a konkrét műszaki megoldásra, azaz az elektronikai, informatikai és mechanikai tervezés bemutatására koncentrálunk, mert ezekkel a témákkal kapcsolatban számos publikáció elérhető. A cikkünkben

főleg a megoldáshoz vezető kísérletsorozatot szeretnénk bemutatni, és egy ajánlást tenni hasonló elrendezés működtetésére annak érdekében, hogy az eredményeink más kutatásokhoz, vagy a mérnöki munkához segítséget adjon

2 Előzmény és háttér

A projekt előzménye egy korábbi feladat, amely színpadi pirotechnikai eszközök rádiófrekvenciás kapcsolattal való működtetése volt nagyon rossz terjedési viszonyok között.

A helyszín az Operaház volt. Az operaház színpadja közel 900 négyzetméteres, belmagassága a színpad vonalában kb. 50 méter. A színpad és környéke tele van fémcsövekkel és lemezekkel: a díszletek, a berendezés, a műszaki területek mind fémvázzal rendelkeznek, vagy teljesen fémről vannak. Ezen felül több emeletnyi vasszerkezeten kell átjutnia a rádiófrekvenciás jelnek. Több technológia csődöt mondott, egyedül a LoRa technológia volt az, ami száz százalékos működési biztonságot adott ezek között a körülmények között.



1. ábra

Az Operaház keresztmetszete és zsinórpadrása [1]

2.1 LoRa technológiai összefoglaló

A LoRa egy fizikai rétegbeli rádió átviteli technológia, amelyet a SEMTECH cég fejlesztett ki. Ugyanez a cég gyártja a rádiós chipet, amelyet széles körben használnak. A legelterjedtebb megoldás a technológia alkalmazására a LoRaWAN, ahol a kommunikáció egy gateway-en keresztül történik. A gateway

kommunikál az eszközökkel, demodulálja az üzeneteket, adatot gyűjt, csomagokat állít elő a továbbküldéshez és továbbítja ezeket a csomagokat a hálózati szervernek. Ez az alkalmazás tehát egyfajta IoT rendszert valósít meg. Előnye, hogy több gateway segítségével adott terület lefedettsége könnyen megoldható. Esetünkben ez a megoldás fizikailag nem alkalmazható, ráadásul jelentős költséggel járna.

A másik megoldás a LoRa pont-pont (P2P) kapcsolat, amelyhez nem kell gateway, hanem az egységek egymás között kommunikálnak. Ez természetesen kompromisszumokkal jár, például a címzés hiánya, a biztonsági réteg hiánya vagy az adaptív sebesség (ADR) hiánya. Ugyanakkor olcsón megvalósítható és egyéb infrastruktúrától független kommunikációt tesz lehetővé. Kísérleteinkben és a végleges rendszer kialakításánál is ezt a topológiát követtük.

Európában a LoRa kommunikáció általában az EU868 sávot használja (863-870 MHz), de lehetőség van a 433 MHz-es sáv (EU433) használatára is. Chirp modulációt használ (chirp spread spectrum, CSS), ami nagy (nyílt terepen 5-15 km) hatótávolságot tesz lehetővé, akár részleges rálátás mellett is. A LoRa alapú kommunikáció half duplex átvitelt biztosít.

2.2 Korábbi fellelt kutatások

A feladat megoldása előtt irodalomkutatást végeztünk korábbi, hasonló kísérletek fellelésének reményében. Három lényeges publikációt találtunk:

- Az első kísérlet 2021-ben, trópusi környezetben, vegetációval sűrűn borított víz felszínén történt [2]. A kommunikáció 915 MHz-en zajlott, az antenna magassága 50 cm és 100 cm volt. Ennél a kísérletnél ugyan víz felszíni kommunikációt vizsgáltak, de nem a hatótávolságon volt a hangsúly, így csak 140 méterig teszteltek. Azt akarták kideríteni, hogy a vegetáció mennyire befolyásolja a rádióhullámok terjedését. Azt tapasztalták, hogy a víz felszínéhez közelebb jobb a terjedés.
- A másik publikáció szintén egy 2021-es kutatásról szólt. Itt vízfelszínen volt az adó és a vevő is. Az antennák speciális antennák voltak (háromszög alakú monopól), néhány centiméterre elhelyezve a víz felszíntől. 868 MHz-en folytak a kísérletek, és 160 méter hatótávolságot értek el. A speciális antennák jobb RSSI-t adtak, mint a gyáriak. [3] Esetünkben utóbbi információ mellékes, mert megvásárolható antennákat kell használnunk.
- Egy korábbi, 2018-ból származó publikációban az olvasható, hogy az antennákat néhányszor 10 méter magasságban helyezték el a tengerszint felett, a parton. Két ilyen, egymást tisztán látó, parton elhelyezett antenna között 23-28 km hatótávolságot értek el. Ez messze van az általunk tárgyalt elrendezéstől, tehát nem vehetjük alapul. Tanulság volt még a

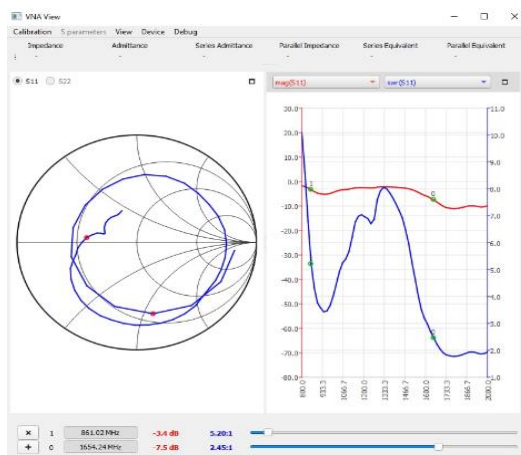
cikkből, hogy 434 MHz-en jobb terjedést értek el. [4] Az általunk alkalmazni kívánt AI50H modul sajnos ezt a frekvenciát nem támogatja, de ha sikertelen lesz a kísérletünk, akkor meg kell fontolni az alacsonyabb frekvenciára való átállást.

A fentiek alapján a felmerült a kérdés, hogy el lehet-e érni stabil átvitelt 3-4 km-es távolságon?

3 Kutatások

3.1 Kezdeti kísérletek

A kutatásainkat Budapesten kezdtük el. Az első vízfelszíni méréseket a Duna Kopaszi-gáttól délre fekvő szakaszán végeztük. Ebben a kísérletben alapvetően azt kellett eldönteni, hogy érdemes-e továbblépni. A kísérlet során a vevőt a vízfelszín közelében tartottuk (10-20 cm), az adót pedig a víz felszínétől számítva körülbelül 1 m magasságban. Sikertelenül próbáltuk 5-6 kilométeres távolságot elérni. Nyilván a teljes reflexiómentességet nem tudtuk megvalósítani, ami azért fontos, mert a LoRa adatátvitel esetén a reflexiók segítik a terjedést, de az látszott, hogy érdemes továbblépni. A kísérletben EK-S76SXB EVK fejlesztőpanelt és ISM-868 antennát használtunk. Az antenna a legolcsóbb, hajlítható könyökkel szerelt antenna volt, típusa nem ismert. 868 MHz-es frekvencián a VSWR értéke 3:1 volt. A gyakorlatban ez azt jelenti, hogy a rádió által leadott teljesítménynek csak körülbelül 75%-a jut ki az antennán keresztül, a fennmaradó rész pedig visszaverődik. Az antenna VNA-val mért karakterisztikája az alábbi ábrán látható.

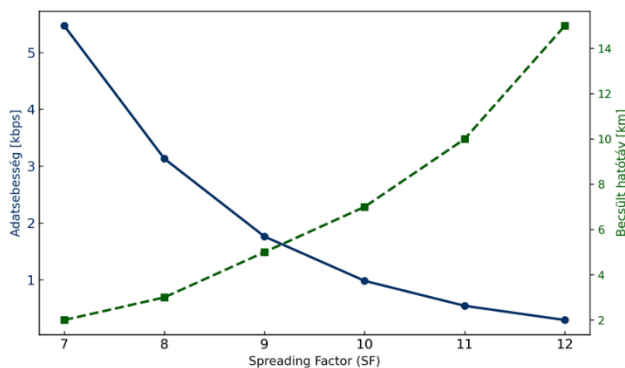


2. ábra Az ISM-868 antenna VNA-val mért karakterisztikája

3.2 Kísérletek a felhasználáshoz hasonló környezetben

A következő kísérletek a Velencei-tó mellett, illetve magán a tavon történtek. Itt már csaknem reflexiómentes környezetben tudtunk vizsgálni. Itt is az előző elrendezést használtuk, de kétféle antennával. egy KERLINK gyári gateway antenna volt (típus: KLK03198).

A gyártói adatlap szerint az antenna 863–876 MHz frekvenciatartományban működik, 50 ohmos impedanciával és félhullámú (half-wave) kialakítással. VSWR értéke $<1.3:1$, maximális nyeresége pedig +3 dBi. A vízben lévő vevőantenna a vízfelszínhez közel helyezkedett el, kb. 30 cm magasságban. A vízparttól távolabbi ideiglenes telepítést egy kenuval oldottuk meg. Az adóval a part több pontjáról végeztünk méréseket. Különböző antennákkal kísérleteztünk illetve többféle SF beállítás mellett is teszteltünk SF7 és SF12 között. Utóbbira azért volt szükség, mert információt akartunk gyűjteni a különböző kiterjesztési tényezők vízfelszíni kommunikációra gyakorolt hatásáról. Az alábbi ábra az SF értékének hatását mutatja az adatsebességre és a hatótávra, szárazföldi körülmények között. Láthatjuk, hogy az SF értéknek növelése az adatsebességet csökkenti, viszont a hatótávolságot növeli. E két paraméter között kellett kompromisszumot találnunk. A következőkben bemutatott mérések során különböző SF beállítások mellett is mértünk, nem csak a helyszín, az antenna és a terep változott.



3. ábra

Az SF paraméter hatása az adatsebességre és a hatótávolságra (szárazföldi körülmények)

A kutatás Velencei-tavi fázisának mérési pontjait mutatja az alábbi ábra. A vevő végig Sukorón volt az evezős pályán, a parttól kb. 120 m távolságra. A parti sáv a mérés idején már átesett a mederrekonstrukciós munkákon, így terméskővel volt terítve a víz és a part találkozása. A parton tereptárgy nem volt, de fás-bokros vegetáció igen. Meglátásunk szerint ilyen körülmények között az adó jelének reflexiója minimális hatással lehetett az átvitel minőségére.

Az adó helyszínei:

- Dinnyés, Sarvajc kilátó. A kilátó 12 méter magas, de az adó körülbelül 5 méter magasan helyezkedett el. Ez az elrendezés közel volt azokhoz a viszonyokhoz, amit a felhasználás helyén terveztek megvalósítani
- Agárdi MOHOSZ kikötő. Itt egészen közel, a part mellé helyeztük el az adót amely körülbelül 1 méter magasságban volt a vízfelszínhez képest. A helyszíneket bemutató képpel ellentétben az antenna a vizsgálat idején természetesen függőlegesen állt.
- Velence, Vitorlás kemping mellett. Innen is sikeres kommunikációs tesztet hajtottunk végre, de ez a teszt inkább abból a szempontból volt fontos, hogy az adó mellett-mögött többemeletes épületek voltak.

Az alábbi, a helyszíneket bemutató ábrán látható, hogy a legnagyobb áthidalat távolság 5,9 km, a legkisebb pedig 3,8 km volt. Tulajdonképpen a specifikáció teljesítéséhez már a 3,8 km-es hatótávolság is elegendő.



4. ábra

A Velencei-tavi mérések helyszínei. Narancssárga csillag: vevő, kék csillagok: adó helyei

A következő ábrák a Velencei-tavi mérések helyszíneit mutatják. Az első képen a kenuban elhelyezett vevő látható (Sukoró).



5. ábra

A vevő elhelyezése

Az adó által bejárt helyszínek közül első a Sarvajc kilátó, a képen éppen a nyereséges KERLINK antennával mértünk.



6. ábra

Az adó a Sarvajc kilátóban

A második helyszínről (Agárd, MOHOSZ kikötő) is közlünk képeket, hogy azonosítható legyen az elhelyezés módja. Az ábrán nem látszik, de az antennát egy műanyag támasz tartotta függőlegesen (balra a tablet a log rögzítéséhez).



7. ábra

Az adó az agárdi MOHOSZ kikötőben

3.2 A kutatások értékelése

A mérési eredményeinkről elmondható, hogy sikeres tesztet hajtottunk végre. A legnagyobb áthidalt távolság csaknem 6 kilométer volt. A mérés során, mint már említettük, logfájlokat készítettünk minden helyszínen és minden SF beállításban. A logfájlok formátuma a mellékelt ábrán látható:

- időbélyeg
- adó RSSI értéke
- vevő RSSI értéke
- SNR érték

Egy fájlrészletet az alábbiakban a hitelesség miatt változatlan formában közlünk annak ellenére, hogy formázási és esztétikai hibákat tartalmaz.

```

18:06:08.083 ^M data: (-116 RSSI (-117) SNR (13)
18:06:08.339 ^M data: (-116 RSSI (-115) SNR (20)
18:06:08.595 ^M data: (-116 RSSI (-117) SNR (13)
18:06:08.866 ^M data: (-116 RSSI (-116) SNR (20)
18:06:09.125 ^M data: (-116 RSSI (-116) SNR (12)
18:06:09.379 ^M data: (-117 RSSI (-116) SNR (15)
18:06:09.650 ^M data: (-116 RSSI (-118) SNR (11)
18:06:09.906 ^M data: (-115 RSSI (-117) SNR (11)
18:06:10.164 ^M data: (-117 RSSI (-117) SNR (11)
18:06:10.433 ^M data: (-115 RSSI (-115) SNR (17)
18:06:10.690 ^M data: (-115 RSSI (-119) SNR (9)
18:06:10.947 ^M data: (-115 RSSI (-116) SNR (14)

```

8. ábra A mérések során készült logfájl szerkezete

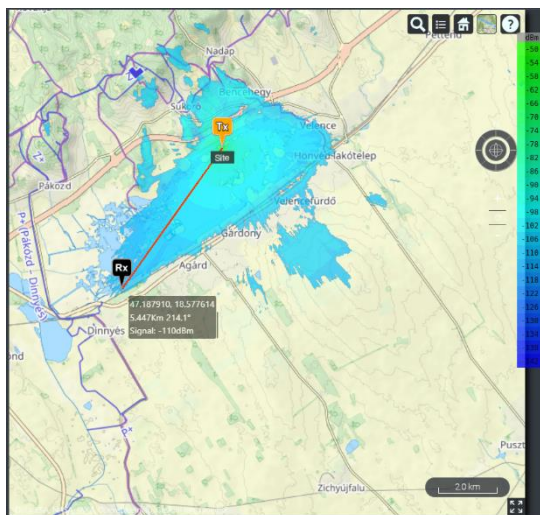
A rögzített adatokat feldolgoztuk és egy átlagolt eredményeket tartalmazó táblázatot alkottunk. Ebben a táblázatban különböző SF beállítások mellett láthatóak az előbbi listában olvasható paraméterek. Az átlagképzésből természetesen kizártuk a mérések elején és végén kapott hibás adatokat. Ezek akkor keletkeztek, amikor a mérés elején és végén az antenna még kézben volt, vagy nem állt még merőlegesen. Az alábbi táblázat a Dinnyési helyszín adatait tartalmazza az olcsó, ISM-868 megjelölésű, hajlítható antennával.

1. táblázat

A dinnyési mérések adatainak összegzése (ISM-868 antennával)

SF beállítás	RSSI 1	RSSI 2	SNR
SF7	-121	-121	-4
SF9	-120	-119	-10
SF10	-125	-120	-1
SF11	-128	-118	-14
SF12	-124	-124	-2

Szimulációt is végeztünk a jelterjedésre a cloudrf.com oldalon, miután a Velencei-tavi mérések megvoltak, majd kiértékeljük azokat. A cél az volt, hogy fel tudjuk mérni azt, hogy a későbbiekben a szimulációra mennyire lehet támaszkodni. Tapasztalataink szerint a szimuláció nagyon jó közelítést ad. Egy szimulációs eredmény az alábbi ábrán látható.



9. ábra

Szimuláció a cloudrf.com oldalon a dinnyési mérésre (KLK03198 antenna)

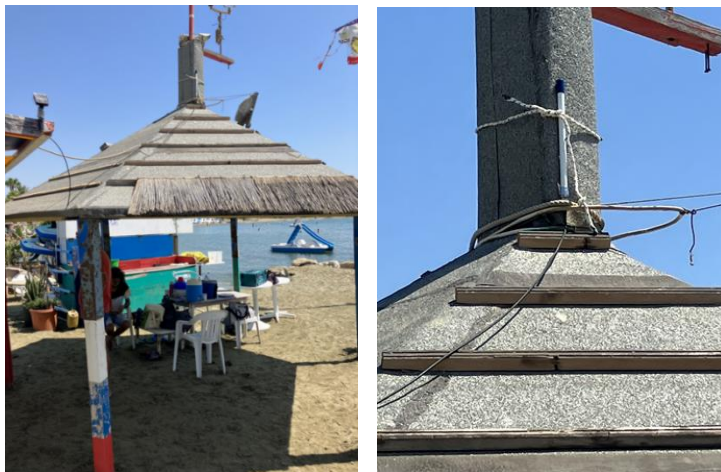
Az eredmények minőségi értékelésénél, tehát annak megállapításánál, hogy a kapott eredmények mennyire felelnek meg a stabil kommunikáció céljára, a gyári ajánlások mellett több publikációt is megvizsgáltunk [5] [6] [7] [8] [9]. Ezek alapján kijelenthető, hogy a kapott értékek a feladat megvalósításához elégségesek.

4. Tesztek a felhasználási helyen

4.1 Prototípus tesztmérések

Ezek után elvégeztettük a prototípus tesztméréseit a tengerparti helyszínen. A mérést a villamos területen közepes mértékben járatos személy végezte, olyan rendszert kellett a kezében adni, ami egyszerű kezelést biztosít. A feladata egy rádiós és egy GPS log készítése volt. Utóbbi a pontos távolság-meghatározáshoz, és a térbeli viszonyok vizsgálata miatt volt fontos. A setup meglehetősen primitív volt, ahogy az az alábbi ábrán is látszik. Az antenna rögzítése például kötéllel történt a kis bódé vasszerkezetének külső burkolatához, ami az alábbi ábrán jól látható. A setup sajnos bizonyos mértékig hibás volt, hiszen a vasszerkezet a burkolat alatti kialakításától függően az antennát elhangolhatja, vagy leárnyékolhatja. A kísérletek ilyen körülmények között csak részben volt sikeres, ráadásul felhasználói hiba miatt bizonyos méréseknél vagy nincs használható

rádiós log, vagy nincs rögzített GPS útvonal. Ennek ellenére azért keletkeztek kiértékelhető eredmények, amelyekről a következőkben írunk.

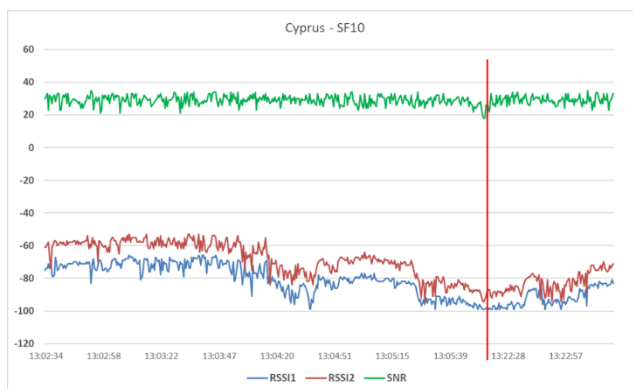


10. ábra

A tengerparti helyszínen az adó antennájának rögzítése és az adó elhelyezkedése

4.2 A prototípus tesztmérések kiértékelése

A következőkben a prototípus tengerparti tesztméréseit értékeljük. Az adóantenna kb. három méter magasan volt, típusa a korábban említett KLK03198 KERLINK gateway antenna. A vevőn lévő antenna ismét az olcsó, ISM-868 jelzésű, hajlítható antenna. A mérés során erős hullámvészesség volt. A mérés során keletkezett logok közül 3 sikerült, az SF11 és az SF12 beállítások melletti mérések rögzítése hibás volt. Az alábbi ábrán SF10 melletti végzett mérés adatait ábrázoltuk az idő függvényében. Az idő a később látható GPS logban is szerepel, így az, hogy a mérési eredmények melyik pozícióról származnak, jól azonosítható.



11. ábra SF10 beállítás mellett mért RSSI és SNR értékek

A késsel ábrázolt adatsor az adó RSSI értéke, a piros karakterisztika a vevő RSSI értékét mutatja, a zöld pedig az SNR-t ábrázolja. A függőleges piros vonal a jelvesztést mutatja. Hiányzó jel esetén szakadás van a karakterisztikákban, a kisebb helyfoglalás miatt ezt a részt kivágtuk az időfüggvényből. A GPS logban az indulás időpontjától, 13:03:08 és 13:10:29 között folyamatos volt a vétel. Ezután jön egy körülbelül 6 perces jelkimaradás. A kimaradás végén a jármű adótól való távolsága 2,3 kilométer volt. A jelkimaradás vélhetően az adóantenna melletti vascső miatt volt, mert minden logban jelentkezett. Miután visszatért a jel, folytonos maradt egészen a jármű visszaérkezéséig (13:25:43). Bár több probléma felmerült, ennek ellenére azt mondhatjuk, hogy a teszt a legszükségesebb adatokat szolgáltatotta, így sikeres volt.

Amint azt például egy kifejezetten tengeri környezetben végzett teszteket bemutató publikációban is olvashatjuk, a hatótávolságot erősen befolyásolja a parti egység antennájának a magassága. [10] Minél magasabban elhelyezett parti antennát javasolnak, és bár itt LoRaWAN-ról van szó, de a jelterjedés a mi esetünkben is várhatóan nagyon hasonlóan alakul.



12. ábra Az SF10 beállítással végzett mérés útvonala

5 A végleges eszköz kialakítása

5.1 A hardver

A végleges eszköz hardvere egy AI50H modulon alapszik. Ebben egy ARM CORTEX M4 processzort integráltak, ami egy 32 bites, 48 MHz-es processzor. A rádiós oldal az SX126x127x-es chipre épül, amely az ISM868 sávban képes működni.

A konfigurálás során a következő paraméterek lettek beállítva:

- frekvencia: 868 MHz
- RF teljesítmény: +21 dBm (125 mW)
- érzékenység: -138 dBm
- sávszélesség: 125 kHz
- kiterjesztés: SF12

- $CR = 4/5$
- preamble = 8
- IQ = normál
- payload hossza: 4 bájt
- bitsebesség: kb. 300 bit/s

5.2 A firmware

A végleges eszköz kommunikációs folyamatát mutatja az alábbi ábra



13. ábra A végleges eszköz kommunikációs folyamata

Az eszközök kommunikációja 3 féle lehet:

- **Párosítás:** a vezérlő egység bekapcsolás után párosítást kér a távoli egységtől. Ha a távoli (vevő) egység párosítás üzemmódban van, válaszol. Ezt az egyszerű folyamatot csak az első hozzárendelésnél kell megcsinálni. Ha a távoli egység a párosítást visszaigazolja, a vezérlőegység beteszi egy listába, ahonnan a későbbiek során elérhetjük.
- **Normál működés:** egy időzített státuszlekérdezés történik akkor is, hogyha nincsen parancsküldés a távoli egység felé. Ez a lekérdezés kb. 30 másodpercenként zajlik le. Válaszként a státusz érkezik, amely tartalmazza az akkumulátor feszültséget, valamint az RSSI és SNR értéket. A teljes tétlenségi időtartam alatt ez a folyamat zajlik ciklikusan
- **Vezérlés:** engedélyezés vagy tiltás parancs kiadása történik, amely erre válaszol (ACK). A vezérlést a későbbiekben ismertetjük.

Az adatsomag felépítése háromféle lehet:

1. Kimenő parancsbájt a mestertől az eszköz felé

- TX cím: 3 bites, a mester saját rádiós azonosítója
- Cél ID: 2 bites, a kiválasztott távoli eszköz azonosítója (0...3)
- Parancs: 3-bites, a végrehajtandó művelet kódját tartalmazza:
 - 010: státuszkérés
 - 10x: átkapcsolás (x = 0: engedélyezés, x = 1: tiltás)

TX cím	Cél ID	Parancs

14. ábra Kimenő parancsbájt (mestertől az eszköz felé)

2. Adatsomag az eszköztől a mester felé (2 bájt)

- TX cím: 3-bites a válasz forrásának rádiós címe
- Eszköz ID: 2 bites, a távoli egység azonosítása
- Státuszjelző: 1 bites, a csomagtípust jelzi
- Akkumulátor szint: 2 biten adja vissza a töltöttségi állapotot
- RSSI: az eszköztől a mester felé a jelerősség szintje 2 biten
- SNR: jel-zaj arány értéke 2 biten
- Eszköz állapot 4 biten a futó állapotkódot adja vissza, pl.: 0x08 – használatban, 0x0C – blokkolva

TX cím	Eszköz ID	Státusz jelző	Akkumulátor szint
RSSI	SNR	Eszköz állapot	

15. ábra Adatsomag az eszköztől a mester felé

3. A válasz ACK bájtja az eszköztől a mester felé

- TX cím: 3 biten meghatározza a küldő eszköz címét
- Eszköz ID: 2 bites, a válaszadó azonosítóját tartalmazza
- ACK: 3-bites, ACK jelzés az adó felé

TX cím	Eszköz ID	ACK

16. ábra A válasz ACK bájtja

Összefoglalás

Kutatásaink eredményei szerint a nagytávolságú ($d \geq 3$ km) adatátvitel vízfelszíni RF terjedés esetén is megvalósítható LoRa P2P (pont-pont) kapcsolattal. Ezt a végleges, helyesen telepített rendszer igazolja. A javasolt topológia: az 1. (adó) antenna árbocon, legalább 3 m-en elhelyezve, a 2. (vevő) antenna a vízfelszínhez közel is lehet ($n \times 10$ cm). Mindkét antennánál javasolt nyereséges antenna használata. Javasolt rádiós beállítások: RF kimenő teljesítmény: +21 dBm, SF12. Az általunk elkészített rendszerben az adási teljesítmény (ISM határérték +24 dBm EIRP) és az adás időkitöltése (maximum: átlag 1% kitöltés) szabályának sértése nem történik.

További kutatásokat kell végezni más megengedett sávban (ISM433), itt kedvezőbb terjedés várható, de az alkalmazott AI50H modul erre a sávra nem alkalmas. További teszteredmények szükségesek irányított adóantenna mellett, amellyel valószínűleg jelentős távolság-növekedés érhető el.

Források

- [1] Magyar Állami Operaház felújítása, <https://zda.hu/hu/zda-project/magyar-allami-operahaz-felujitasa/> (letöltve 2025. 10. 26.)
- [2] A. Gutiérrez-Gómez, V. Rangel, R. M. Edwards, J. G. Davis, R. Aquino, J. López-De la Cruz, O. Mendoza-Cano, M. Lopez-Guerrero and Y. Geng, “A Propagation Study of LoRa P2P Links for IoT Applications: The Case of Near-Surface Measurements over Semitropical Rivers,” *Sensors*, vol. 21, no. 20, p. 6872, Oct. 2021, doi: 10.3390/s21206872
- [3] A. Dala and T. Arslan, “Design, Implementation, and Measurement Procedure of Underwater and Water Surface Antenna for LoRa Communication,” *Sensors*, vol. 21, no. 4, p. 1337, Feb. 2021, doi: 10.3390/s21041337
- [4] M. Centenaro, A. Vangelista, F. M. Ronga and M. Zanella, “Long-Range Communications in Unlicensed Bands: The Case of LoRa™ in the IoT,” *Sensors*, vol. 18, no. 9, p. 2853, Sept. 2018, doi: 10.3390/s18092853
- [5] W. Xu et al., “Measurement, Characterization, and Modeling of LoRa Technology in Multifloor Buildings,” *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 7, no. 1, pp. 298–310, 2020, doi: 10.1109/JIOT.2019.2946900
- [6] S. Demetri et al., “Automated Estimation of Link Quality for LoRa: A Remote Sensing Approach,” in *Proc. 18th ACM/IEEE Int. Conf. Information Processing in Sensor Networks (IPSN)*, Montreal, QC, Canada, 2019, pp. 145–156, doi: 10.1145/3302506.3310396

- [7] A. E. Ferreira et al., “A Study of the LoRa Signal Propagation in Forest, Urban, and Suburban Environments,” *Annals of Telecommunications*, vol. 75, pp. 333–351, 2020
- [8] K. Peppas, “New Results for the Error Rate Performance of LoRa Systems,” *Sensors*, vol. 22, no. 9, p. 3350, 2022, doi: 10.3390/s22093350
- [9] C. F. Dias, E. R. de Lima and G. Fraidenraich, “Bit Error Rate Closed-Form Expressions for LoRa Systems under Nakagami and Rice Fading Channels,” *Sensors*, vol. 19, no. 20, p. 4412, 2019, doi: 10.3390/s19204412
- [10] S. Pensieri et al., “Evaluating LoRaWAN Connectivity in a Marine Scenario,” *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 9, no. 11, p. 1218, 2021, doi: 10.3390/jmse9111218

New Trends in Energy Harvesting Through Magnetic Nanofluids

**Ján Zbojovský, Matej Vaľko, Kristián Glajc, Michal Rajňák,
Juraj Kurimský**

Department of Electric Power Engineering, Technical University of Košice, Letná
1/9, 042 00, Košice, Slovakia

Institute of Experimental Physics, SAS, Watsonova 47, 04001, Košice, Slovakia

Abstract: The global shift towards sustainable energy solutions has intensified research into advanced energy harvesting systems, with nanofluids – especially their magnetic variants – becoming key materials. This comprehensive study synthesizes bibliometric and scientometric analyses to map the development of nanofluid applications in energy technologies between 2020 and 2025 using tools such as VOSviewer and the Web of Science database. The findings reveal a consistent increase in publications, underscoring growing global interest and collaboration, particularly between countries such as China, India, Saudi Arabia, Pakistan, and Iran. Key thematic groups include: Efficiency and thermal performance: improving the thermal conductivity and heat transfer properties of nanofluids is key to advancing energy harvesting technologies; Energy conversion and photothermal effects: integrating nanofluids into solar collectors and photovoltaic-thermal systems increases their efficiency; Fluid dynamics and optimization: research focuses on viscosity, stability, and system-level optimization for efficient energy transfer; Magnetohydrodynamic, thermoelectric, and thermomagnetic applications: Magnetic nanofluids are increasingly used in systems utilizing magnetohydrodynamics, thermoelectric and thermomagnetic effects (Seebeck and Nernst effects), and the conversion of vibrational energy to transform thermal and mechanical gradients into electricity. Current studies point to the emergence of hybrid and smart magnetic nanofluids with improved stability and long-term performance, offering promising possibilities for thermoelectric devices, waste heat utilization, and motion-based energy harvesting. Despite significant progress, challenges remain in optimizing the properties of nanofluids for industrial applicability and economic viability. This study highlights the transformative potential of nanofluids, particularly magnetic ones, in the development of sustainable technologies through the combination of magnetism, thermodynamics, and nanotechnology.

Keywords: Energy harvesting; Nanofluids; Fe₃O₄; Multi – walled carbon nanotubes (MWCNT); SiO₂

1 Introduction

Energy is a critical quantitative property that must be transferred—via work or heat—before any system can perform work. In the context of energy harvesting, heat transfer occurs whenever a temperature difference exists, moving energy from high to low temperatures. This phenomenon is fundamental to numerous applications, ranging from the conversion of solar energy into power in thermal collectors, to the regulation of temperature in electronic devices and so on [1], [2], [3], [4].

While Maxwell first discussed suspending micro-scaled particles over a century ago, those suspensions suffered from rapid settling and channel clogging. The solution emerged with the introduction of "nanofluids" by Choi and Eastman—engineered colloidal suspensions of nanoscaled particles (10–100 nm). These particles, often composed of metals, metallic oxides, or carbon-based elements, offer significantly enhanced thermophysical properties compared to pure fluids. Specifically, mechanisms such as the Brownian motion of particles and particle/fluid nanolayers allow for intensified heat transfer with reduced pump power requirements [4], [5], [6], [7].

Despite challenges related to sedimentation, agglomeration, and production costs, the application of nanofluids has received increasing attention for its potential to change the field of energy harvesting. Research indicates that 512 papers were published on this subject in the period of 2020–2025 alone, highlighting a shift toward optimizing these fluids for next-generation heat transfer devices. This review explores the progression of these technologies, serving as a foundation for understanding new trends in manipulating these fluids—such as through magnetic fields—to maximize energy harvesting efficiency [4], [8], [9].

2 Scientometric Analysis

Scientometrics, first conceptualized by Nalimov et al. in 1971 [10], represents a quantitative methodological approach to analyzing the evolution of science as an informational process. Fundamentally, it involves the study of the quantitative dimensions of science and technology viewed through the paradigm of communication. The primary objectives of this discipline include the evaluation of scientific performance, the mapping of research impact within specific domains of interest, and the development of productivity metrics to provide strategic guidance for scientific endeavors. Its core areas of focus encompass methodologies for assessing research quality and influence, elucidating citation dynamics, delineating scientific fields, and applying these indicators to research policy and management [11], [12].

Although the scope of scientometrics encompasses the investigation of numerous facets of science and technology, in practice, it is predominantly anchored in citation analysis. The citation of external research within scientific literature establishes a relational network among authors, creating a field of connections that is subject to quantitative assessment.

These visual representations of interconnectivity are termed **bibliometric maps**. Such mapping tools facilitate the analysis of core themes and their interrelationships within a specific domain, allow for the longitudinal tracking of developmental trends, and enable the identification of key actors, including researchers, institutions, and journals. The previously discussed citation databases serve as the primary data repositories for generating these visualizations.

2.1 Scietometric Analysis of the Energy Harvesting

To systematically illustrate the characteristics and prevailing trends of publications within the area of interest, a bibliometric analysis was conducted utilizing the VOSviewer software. The underlying dataset was retrieved from the Web of Science (WoS) database through an advanced search strategy employing logical operators to ensure the precision and relevance of the gathered literature. This analysis focuses on the timeframe from January 1, 2020, to October 9, 2025, facilitating the mapping of scientific influence, key thematic clusters, and the structural evolution of research during this period.

Significance of this area of research is highlighted in growing number of publications throughout the given timeframe, reflecting the growing significance of this research area, particularly given the global imperative for enhanced energy efficiency and sustainable technology. The quantitative progression of this research output, highlighting the continuous year-on-year growth within the examined timeframe, is visually summarized in the Figure 1.

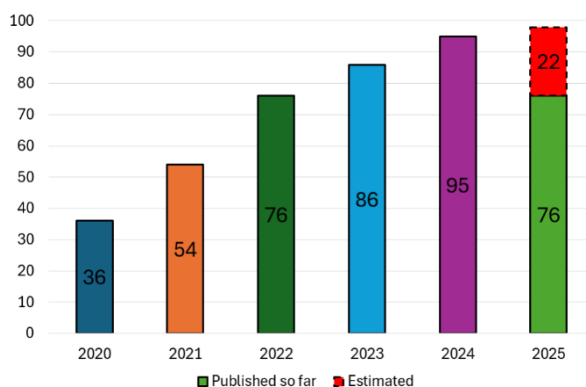


Figure 1

Number of publications in the area of interest throughout the years

2.1.1 Co – Authorship Bibliometric Map of the area of interest

The Figure 2 presents a network visualization of international collaboration (co-authorship) among countries active in this research domain. In this map, the size of each circular node is proportional to the number of published documents associated with that country, indicating its total research output. The lines connecting the nodes represent co-authorship links, where the thickness and distance reflect the strength and frequency of collaboration between nations. Colors signify distinct clusters of countries that frequently collaborate with one another.

Key Observations:

1. **Dominant Research Hubs:** The map reveals a multipolar research landscape heavily dominated by Asian and Middle Eastern nations. The People's Republic of China (Yellow cluster) appears as the largest node, signifying its leading position in terms of publication volume in this field. India (Blue cluster) and Saudi Arabia (Red cluster) follow as major contributors, highlighting the significant scientific investment and output from these regions regarding magnetic nanofluids and energy harvesting. The top 5 list of major contributors is completed by Pakistan and Iran.
2. **Clustering and Collaboration Patterns:** The VOSviewer algorithm has grouped the countries into several distinct clusters, revealing geographical and strategic research alliances:
 - **The Yellow Cluster:** Centered around China, this group shows strong collaborative ties with Pakistan, Turkey, Japan, Poland, and Thailand;
 - **The Blue Cluster:** Anchored by India, this cluster includes the USA, Canada, the United Arab Emirates, and Malaysia. This grouping indicates that India serves as a crucial hub connecting Western research institutions (North America) with Asian and Middle Eastern partners;
 - **The Red Cluster:** Dominated by Saudi Arabia, this group demonstrates a strong regional network involving Egypt, Jordan, and Lebanon, extending to Taiwan and Nigeria;
 - **The Green Cluster:** This cluster largely represents European and South American collaboration, featuring England, France, Spain, Russia, Brazil, and Türkiye;
 - **The Purple Cluster:** Iran forms the core of a smaller cluster, showing distinct collaborative links with Australia.

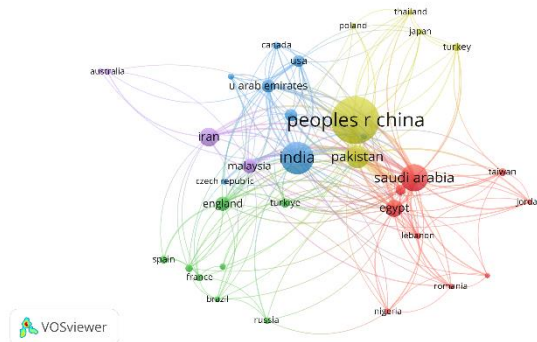


Figure 2

Co – authorship Bibliometric map of Countries Active in the Research Area

2.1.2 Co – Occurrence Keyword Analysis

The Figure 3 presents a network visualization of keyword co-occurrence, illustrating the conceptual structure and most frequently discussed topics within the examined literature. In this map, the size of each node represents the frequency of the keyword's appearance in the dataset, while the lines indicate the strength of the relationship (co-occurrence) between terms. The distance between nodes reflects their thematic relatedness, and distinct colors represent clusters of closely related research topics.

Key Observations:

1. **Central Themes and Dominant Concepts:** The map is anchored by the term "nanofluids", which appears as the largest node in the Green Cluster, serving as the central hub connecting all other thematic areas. This confirms that nanofluids are the foundational subject of the dataset. Closely linked to this are high-frequency terms such as "heat-transfer" (Red Cluster) and "performance" (Green Cluster), indicating that the primary research objective is the enhancement of thermal transfer capabilities and overall system efficiency.
2. **Thematic Clustering:** The VOSviewer algorithm has segregated the research interests into four primary clusters, each representing a specific sub-field or approach:
 - **The Green Cluster (Applications and Performance):** This cluster focuses on the practical application of nanofluids in energy systems. Key terms include "performance", "collector", "energy", "nanoparticles", and "photothermal conversion". This suggests a heavy emphasis on solar collectors and the efficiency gains realized through nanoparticle integration;

- **The Red Cluster (Fluid Dynamics and Transport Phenomena):** This group represents the fundamental physics and theoretical analysis of the field. Dominant terms include "heat-transfer", "flow", "convection", "entropy generation", "porous medium", and "thermal radiation". Notably, terms like "MHD" (Magnetohydrodynamics) and "stretching sheet" appear here, pointing to theoretical modeling of fluid behavior under various physical forces, including magnetic fields;
 - **The Yellow Cluster (Thermophysical Properties and Characterization):** Located at the top, this cluster deals with the fluid properties themselves. Keywords such as "stability", "thermal conductivity", "viscosity", and "graphene" highlight the focus on synthesizing stable fluids and characterizing their material properties to ensure they are suitable for heat transfer;
 - **The Blue Cluster (System Design and Optimization):** This cluster, situated at the bottom, links the fluid science to engineering systems. Keywords like "solar energy", "design", "optimization", "exergy", and "storage" (including phase change materials) indicate research into the thermodynamic optimization of complete energy systems and storage units;
3. **Interconnectivity:** There is a high density of links between the **Yellow Cluster** (properties) and the **Red Cluster** (heat transfer), as well as between the **Green Cluster** (performance) and the **Blue Cluster** (systems). This demonstrates that the field is highly interdisciplinary, where material synthesis (Yellow) directly informs theoretical modeling (Red), which is then applied to system performance (Green) and engineering design (Blue).

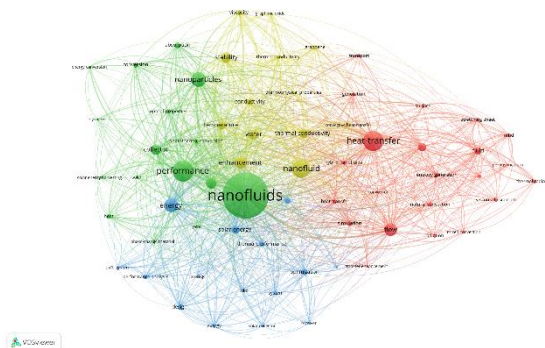


Figure 3

Co – Occurrence Bibliometric map of Countries Active in the Research Area

3 Trends in the Research of Energy Harvesting Nanofluids

This chapter reviews current trends in this rapidly evolving field, highlighting key developments and methodologies. In particular, two original researches—one conducted in China and another in Iran—are analyzed to illustrate regional research approaches, experimental techniques, and performance outcomes. These researches provide insight into the global progress and future directions of energy harvesting nanofluid technology.

3.1 Publication no. 1

This publication [13] by researchers from China and South Korea named *Improvement of Photo-thermal Energy Conversion Performance of MWCNT/Fe₃O₄ Hybrid Nanofluid* was published in the journal *Energy* in the beginning of 2020.

The primary objective of this research was to enhance the photo-thermal energy conversion properties of magnetite (Fe₃O₄) nanofluids by creating a hybrid nanofluid through the addition of multi-walled carbon nanotubes (MWCNTs).

While Fe₃O₄ nanofluids have unique magnetic properties useful for separation and heat transport, they lack the high optical absorption capabilities of carbon-based nanomaterials. Consequently, the study aimed to investigate the thermal conductivity, optical transmittance, and photo-thermal energy conversion efficiency of this hybrid mixture ratio suspended in a base fluid of water and ethylene glycol with 80:20 ratio.

3.1.1 Key Findings

The study provided significant insights into the superior performance of hybrid nanofluids over single-component nanofluids:

- **Enhanced Optical Absorption:** addition of MWCNTs drastically improved light absorption. The base fluid was transparent, and pure Fe₃O₄ showed a maximum light transmittance of 89% (meaning it let most light pass through). In contrast, the hybrid nanofluid exhibited significantly lower transmittance (higher absorption), with the best sample allowing only 29% of light to pass. The solar weighted absorption fraction for the hybrid fluid was 1,0 (100% absorption) at almost all mixing ratios;
- **Superior Thermal Properties:** thermal conductivity of the fluids increased with both temperature and nanoparticle concentration. The hybrid nanofluids demonstrated higher thermal conductivity than pure

Fe_3O_4 fluids, attributed to the high intrinsic conductivity of MWCNTs and the increased specific surface area for heat transfer;

- **Photo-thermal Conversion Improvement:** hybrid nanofluid demonstrated a much faster temperature response and higher overall efficiency than the pure Fe_3O_4 fluid. Specifically, the hybrid fluid containing the highest amount of MWCNT had nearly two times the photo-thermal energy conversion efficiency of the Fe_3O_4 nanofluid at the same weight concentration.

3.1.2 Best Sample

The study concluded that the MWCNT/ Fe_3O_4 hybrid nanofluid with a mixing ratio of 4/1 (MWCNT to Fe_3O_4) at a total concentration of 0,01 wt% was the most effective. It achieved:

- **Highest maximum thermal conductivity:** 0,562 $\text{W/m}\cdot^\circ\text{C}$ at 50 $^\circ\text{C}$ (Hiba! A hivatkozási forrás nem található.);
- **Lowest light transmittance** of 29%;
- **Highest maximum total stored energy:** 2400 kJ/kg ().

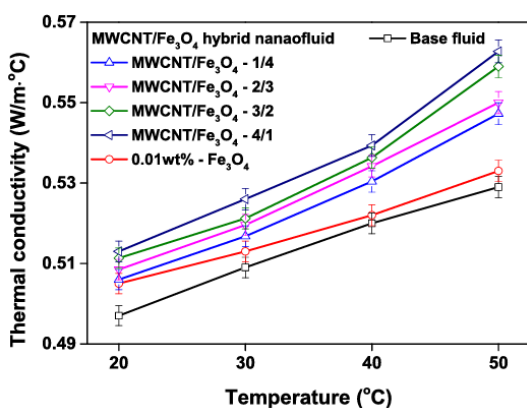


Figure 4

Thermal Conductivity dependant on the Temperature of examined MWCNT/ Fe_3O_4 hybrid nanofluid samples [13]

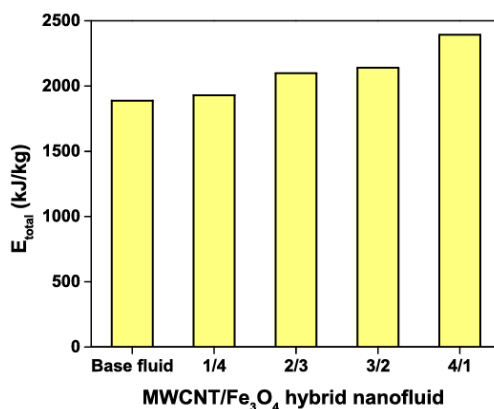


Figure 5

Total Stored Energy dependant on the Concentration of examined MWCNT/ Fe_3O_4 hybrid nanofluid samples [13]

3.2 Publication no. 2

This publication [14] by researchers from Iran and China named *Exergetic and environmental assessment of a photovoltaic thermal – thermoelectric system using nanofluids: Indoor experimental tests* was published in the journal *Energy Conversion and Management* in mid 2020.

The primary objective of this study was to experimentally evaluate the performance of a hybrid photovoltaic thermal-thermoelectric (PVT/TE) system. The researchers aimed to solve the issue of overheating in Photovoltaic (PV) cells—which reduces electrical efficiency—by integrating a Thermoelectric Generator (TEG) to recover waste heat and convert it into additional electricity. To optimize this system, the study investigated five different cooling approaches to manage the temperature of the TEG's cold side:

- Natural air cooling;
- Forced air cooling;
- Pure water cooling;
- SiO₂ - water nanofluid;
- Fe₃O₄ - water nanofluid.

The performance was assessed based on energy efficiency, exergy efficiency, and environmental impact (carbon mitigation).

3.2.1 Key Findings

The experimental results highlighted the superiority of nanofluids over conventional cooling methods (water and air) in all tested categories:

- **Superior Thermal Properties:** the use of nanofluids resulted in better cooling of the PV cell and a higher temperature gradient across the TE module compared to water and air. This enhancement was attributed to physical phenomena such as the Brownian motion of nanoparticles, which increases the effective thermal conductivity of the fluid, and the reduction of the thermal boundary layer thickness;
- **Enhanced Optical and Heat Absorption:** the study noted that adding nanoparticles improves the working fluid's capability to absorb radiation (heat). The SiO₂-water nanofluid, in particular, yielded the highest outlet temperature 47,5 °C, indicating effective heat absorption from the system;
- **Photo-thermal Conversion Improvement:** the system achieved its maximum energy efficiency when using the SiO₂-water nanofluid at a fixed irradiation of 900 W/m². Furthermore, the total exergy efficiency

and exergy gain were significantly increased by using nanofluids compared to pure water;

3.2.2 Best Sample

The study concluded that the **SiO₂-water nanofluid** was the best performing coolant. It achieved:

- **Highest electrical efficiency of PV cell** (Figure 6);
- **Highest temperature gradient across the thermoelectric module** (28,9 °C);
- **Maximum electrical efficiency for the thermoelectric module** (Figure 7).

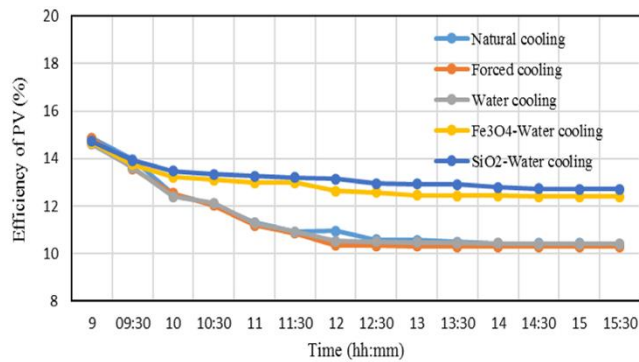


Figure 6

Electrical Efficiency of PV cell dependant on time for different cooling techniques [14]

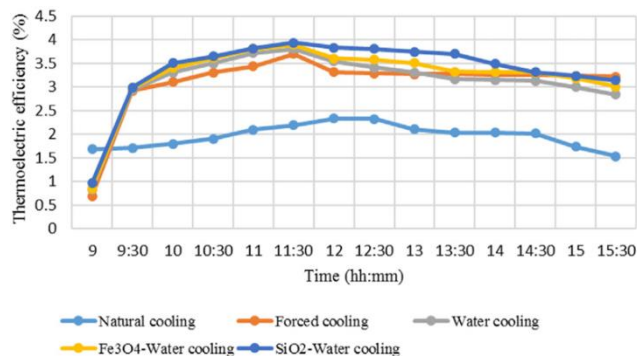


Figure 7

Electrical Efficiency thermoelectric module dependant on time for different cooling techniques [14]

4 Conclusion

The core finding across both studies is that dispersing nanoparticles into a base fluid significantly enhances thermal conductivity and optical properties, leading to higher overall system efficiency. The best performance is application-dependent:

1. For Direct Absorption Solar Collectors, the MWCNT/Fe₃O₄ hybrid nanofluid was found to be the best, achieving superior solar absorption and a 26,6% increase in stored thermal energy due to its carbon-based light absorbance.
2. For PVT/TE systems, the SiO₂-water nanofluid was the most effective coolant, maintaining a higher temperature gradient across the thermoelectric module and maximizing electrical output by efficiently removing waste heat from the PV cell.

In summary, the utilization of advanced nanofluids is critical for maximizing both the energy and exergy efficiency, and for improving the environmental profile, of next-generation energy harvesting technologies.

Acknowledgement

This research was funded by the Ministry of Education, Research, Development and Youth within the project VEGA 2-0029-24, 1-0380-24 and the Slovak Agency for Research and Development based on contracts no. APVV-22-0115.

References

- [1] V. Murali Krishna and M. Sandeep Kumar, 'Numerical analysis of forced convective heat transfer of nanofluids in microchannel for cooling electronic equipment', *Materials Today: Proceedings*, vol. 17, pp. 295–302, 2019, doi: 10.1016/j.matpr.2019.06.433.
- [2] T. L. Bergman and A. S. Lavine, *Fundamentals of heat and mass transfer*, Eighth edition. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2017.
- [3] N. Zhao, S. Li, and J. Yang, 'A review on nanofluids: Data-driven modeling of thermalphysical properties and the application in automotive radiator', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 66, pp. 596–616, Dec. 2016, doi: 10.1016/j.rser.2016.08.029.
- [4] E. C. Okonkwo, I. Wole-Osho, I. W. Almanassra, Y. M. Abdullatif, and T. Al-Ansari, 'An updated review of nanofluids in various heat transfer devices', *J Therm Anal Calorim*, vol. 145, no. 6, pp. 2817–2872, Sept. 2021, doi: 10.1007/s10973-020-09760-2.
- [5] J. C. Maxwell, *A treatise on electricity and magnetism*. in Third, no. 3. New York, NY, U.S.A.: Dover Publications Inc, 1954.

- [6] S. U. S. Choi and J. A. Eastman, 'Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles', Argonne National Lab. (ANL), Argonne, IL (United States), ANL/MSD/CP-84938; CONF-951135-29, Oct. 1995. Accessed: Dec. 20, 2022. [Online]. Available: <https://www.osti.gov/biblio/196525>
- [7] P. Sivashanmugam, 'Application of Nanofluids in Heat Transfer', 2012. doi: 10.5772/52496.
- [8] N. Ali, J. A. Teixeira, and A. Addali, 'A Review on Nanofluids: Fabrication, Stability, and Thermophysical Properties', *Journal of Nanomaterials*, vol. 2018, no. 1, p. 6978130, 2018, doi: 10.1155/2018/6978130.
- [9] S. K. Das, S. U. S. Choi, and H. E. Patel, 'Heat Transfer in Nanofluids—A Review', *Heat Transfer Engineering*, vol. 27, no. 10, pp. 3–19, Dec. 2006, doi: 10.1080/01457630600904593.
- [10] V. V. Nalimov and Z. M. Mulchenko, 'Measurement of Science. Study of the Development of Science as an Information Process.', Foreign Technology Div Wright-Patterson AFB Ohio, AD735634, 1971. Accessed: Mar. 04, 2025. [Online]. Available: <https://ntrl.ntis.gov/NTRL/dashboard/searchResults/titleDetail/AD735634.xhtml>
- [11] J. Mingers and L. Leydesdorff, 'A Review of Theory and Practice in Scientometrics', *European Journal of Operational Research*, vol. 246, no. 1, pp. 1–19, Oct. 2015, doi: 10.1016/j.ejor.2015.04.002.
- [12] S. López-Pernas, M. Saqr, and M. Apiola, 'Scientometrics: A Concise Introduction and a Detailed Methodology for Mapping the Scientific Field of Computing Education Research', in *Past, Present and Future of Computing Education Research: A Global Perspective*, M. Apiola, S. López-Pernas, and M. Saqr, Eds, Cham: Springer International Publishing, 2023, pp. 79–99. doi: 10.1007/978-3-031-25336-2_5.
- [13] Y. Tong, T. Boldoo, J. Ham, and H. Cho, 'Improvement of photo-thermal energy conversion performance of MWCNT/Fe₃O₄ hybrid nanofluid compared to Fe₃O₄ nanofluid', *Energy*, vol. 196, p. 117086, Apr. 2020, doi: 10.1016/j.energy.2020.117086.
- [14] S. Soltani, A. Kasaeian, A. Lavajoo, R. Loni, G. Najafi, and O. Mahian, 'Exergetic and enviromental assessment of a photovoltaic thermal-thermoelectric system using nanofluids: Indoor experimental tests', *Energy Conversion and Management*, vol. 218, p. 112907, Aug. 2020, doi: 10.1016/j.enconman.2020.112907.

Műtárgyvédelem a raktározás és szállítmányozás relációjában

Lőrincz László

Lőrincz László [Óbudai Egyetem Biztonságtudományi Doktori Iskola, 1088 Budapest, Népszínház utca 8., Magyarország], lorincz.laszlo@uni-obuda.hu

Absztrakt: A kutatás az intézményi műtárgyvédelem rendszerét vizsgálja az időszaki kiállítások összetett logisztikai folyamataiban, kiemelve a raktározás és szállítmányozás szerepét a hazai – mintegy 1700 közgyűjteményt érintő – gyakorlatban. A tanulmány rámutat az állományvédelem és vagyonvédelem közötti intézményi hangsúlyeltérésekre, valamint a műtárgyvédelmi szabályozás töredezettségére, amely különösen a projektalapú működésben eredményez kockázatokat. A kutatás egyik fontos eredménye a lokál “kis” múzeumi raktárak és a regionális “nagy” raktárközpontok összehasonlítása, amely egy hibrid, fenntartható és biztonságközpontú modell szükségességét támasztotta alá. A jelen vizsgálat a raktározás és szállítás biztonságtechnikai, hozzáférés-ellenőrzési és felelősségi kérdéseire fókuszál, feltárva a szállítmányozási lánc kritikus pontjait és javaslatot téve adaptív, preventív vagyonvédelmi gyakorlatokra. Az eredmények hozzájárulnak ahhoz, hogy a műtárgyvédelem a jövő kiállítási projektjeiben integrált, stratégiai tervezési elemként jelenjen meg.

Kulcsszavak: műtárgyvédelem, műtárgyak raktározása, műtárgyak szállítmányozása

1 Bevezetés

Kutatás központi témája az intézményi műtárgyvédelem, ezen belül is az időszaki kiállításokhoz kapcsolódó műtárgyvédelmi protokollok vizsgálata. A doktori kutatás témája az “Intézményi műtárgyvédelem az időszaki kiállítások vonatkozásában”. Ezt az eddigi személyes tapasztalatok is alátámasztják, hogy az időszaki kiállítások megvalósítása során, akár rövid időn belül, egy jól meghatározott időkereten belül teljes képet kaphatunk egy közgyűjteményi intézmény műtárgyvédelmi működéséről. Az előkészítő és megvalósítási folyamatok – szállítás és tárolás, ideiglenes betárolás és biztonságtechnikai konzultációk – láthatóvá tesznek minden olyan tényezőt, amely egyébként rejtve maradhatnak a napi működés során. Ráadásul a hazai viszonyokat figyelembe véve közel 1700 közgyűjteményi intézmény tartozik a közgyűjteményi intézményrendszereket szabályozó törvény hatálya alá, így a jelen tanulmány

nemcsak aktuális, hanem kifejezetten releváns az intézményi fejlesztések szempontjából is. [1]

Az intézményi műtárgyvédelem két meghatározó területe – a vagyonvédelem és az állományvédelem – gyakran átfedésben van, ugyanakkor eltérő hangsúlyokkal bírnak az intézményi működésben. Az állományvédelem a műtárgyak hosszú távú védelmét foglalja magában fizikai, klimatikus és konzerválási szempontból, míg a vagyonvédelem elsősorban a lopás, a vandalizmus és a rongálások elleni aktív biztonsági intézkedésekre összpontosít. A kutatások előrehaladtával egyre nyilvánvalóbbá vált, hogy bár léteznek nemzetközi ajánlások és hazai szakmai irányelvek, a műalkotásvédelem gyakorlati szabályozása gyakran hiányos, széttagolt vagy következetlen. Nemcsak az alkalmazott protokollok különböznek országonként, hanem a gyakorlatok is eltérőek lehetnek ugyanazon közgyűteményi intézményen belül, különösen az időszakos kiállítások esetében, ahol projekt alapú szervezés történik. Ennek eredményeként a preventív megközelítés – azaz a kiállítások előtti összehangolt konzultációk műtárgyvédelmi szempontból – gyakran nem, vagy csak formálisan valósulnak meg, ami komoly kockázatot jelent mind az állományvédelmi, mind a vagyonvédelmi elvárásokra nézve.

Az intézményi műtárgyvédelem kérdése az elmúlt években fokozott figyelmet kapott mind nemzetközi, mind hazai szinten, különösen az időszakos kiállítások szervezésének összetett logisztikai folyamataival összefüggésben. Ezen kiállítási formátumok sajátosságai miatt a műtárgyak fizikai mozgatása, ideiglenes tárolása és szállítása speciális kockázatokkal jár, amelyek különös figyelmet igényelnek a közgyűteményi intézményrendszerek részéről. Alapkutatási fókuszában ezért az intézményi műtárgyvédelem szisztematikus vizsgálata áll, különös tekintettel két kulcsterületére: az állományvédelemre és a vagyonvédelemre, valamint azok gyakorlati megvalósítására.

Meghatározó eredmény volt az IEEE TechDefense 2024 nemzetközi tudományos konferencián bemutatott tanulmányom, amely a “kis” helyi múzeumi raktárak és a “nagy” regionális raktárak összehasonlító elemzését ismertette. A tanulmány kvalitatív módszerekkel – interjúkkal, esettanulmányokkal – vizsgálta a különböző raktári modellek előnyeit és korlátait a műtárgyvédelem szempontjából. Az eredmények alapján kijelenthető, hogy a kisebb, helyi raktárak gyors és költséghatékony működést biztosítanak, míg a regionális raktárak nagyobb kapacitással és fejlettebb biztonsági infrastruktúrával rendelkeznek, de megvalósításuk és karbantartásuk erőforrás igényesebb. A tanulmány következtetése egy hibrid modell lehetséges bevezetése volt: egy olyan modellé, amely a helyi raktárak modernizációját a stratégiai pontokon elhelyezkedő regionális központokkal ötvözi, figyelembe véve a fenntarthatóságot, az energiagazdálkodást és a műtárgyvédelmet.

Ez az összehasonlító kutatás elsőként világított rá arra is, hogy a műtárgyvédelem kérdése nem korlátozódhat a tárolási feltételek technikai vagy környezeti aspektusaira. A műtárgyak biztonságos mozgatása – legyen szó belföldi vagy nemzetközi szállításról – ugyanolyan kritikus eleme a műtárgyvédelmi

rendszernek, mint maga a kiállítás vagy a tárolás. Különösen az időszaki kiállítások esetében válik még fontosabbá az a tény, hogy a műalkotásokat ismételtlen mozgatják, betárolják és tárolják, újracsomagolják és szállítják egy összetett, összefüggő logisztikai láncban, amelynek minden pontja potenciális veszélyt jelenthet a gyűjtemény integritására.

A tanulmány célja ennek a komplex műtárgyvédelmi rendszernek a vizsgálata, különös tekintettel a tárolási és szállítási gyakorlatokra. A kutatás kettős célokat tűz ki maga elé: egyrészt feltárja a jelenlegi intézményi gyakorlatokban rejlő problémás területeket (pl. nem professzionális csomagolás, nem megfelelő légkondicionálás, logisztikai kapacitás hiánya stb.), másrészt azonosítja azokat a jó gyakorlatokat, amelyek nemzetközileg bevált módszerek alkalmazásával elősegítik a műtárgyak megóvását és biztonságát a teljes kiállítási ciklus alatt.

A kutatás egyik fő célja olyan gyakorlatias, szakmailag megalapozott javaslatok kidolgozása, amelyek életképes alternatívát kínálnak nemcsak a nagy múzeumok, hanem a kisebb közgyűjtemények számára is. Ezen javaslatok kidolgozásakor különös figyelmet fordítanak a fenntartható megoldásokra, az intézményi kapacitásokhoz igazított adaptív logisztikai modellekre, valamint a professzionális, modern műtárgyszállítmányozási protokollokra. A kutatás célja az is, hogy a hazai és nemzetközi példák összehasonlításával hozzájáruljon ahhoz, hogy a műtárgyvédelem ne csupán adminisztratív feladat legyen a jövőbeli kiállítási projektekben, hanem integrált, stratégiai tervezési szempont is. Fontos hangsúlyozni, hogy ez a kutatás nem terjed ki a műtárgyak csomagolásának részletes vizsgálatára, mivel az a műtárgyvédelem egy önálló, komplex területe, amely külön kutatás tárgya lehet. A műtárgyak csomagolása nem kizárólag a szállításhoz kapcsolódik: a közgyűjteményi intézmények gyakorlatában sok esetben a tárolás is csomagolt állapotban történik, illetve a csomagolási és kicsomagolási folyamatok az előkészítő helyiségekben, illetve a kiállítótérbe történő átszállítás során zajlanak. Ezekben elsősorban az állományvédelmi szempontok kerülnek előtérbe: a klimatikus stabilitás, a fizikai védelem, a káros anyagok kizárása, vagy a hosszú távú megőrzés feltételeinek biztosítása.

Ezzel szemben a jelen tanulmány, akárcsak a PhD alapkutatásunk, elsősorban a műtárgyak vagyónvédelmi vonatkozásaira összpontosít, aállítás biztonsági, ellenőrzési, felelősségi és logisztikai kihívásainak feltérképezésével. Ezt különösen az indokolja, hogy a csomagolási folyamatok – akár raktárban, akár múzeumi, kiállítási környezetben – jellemzően szigorúan ellenőrzött körülmények között, több tudományág (kurátor, művészettörténész, restaurátor, műtárgytulajdonos) jelenlétében zajlanak, ahol a vagyónvédelmi protokollokat a leltárvédelmi előírások egészítik ki. A doktori kutatás fókuszában azonban a biztonsági kockázatok minimalizálása, a preventív vagyónvédelmi tervezés és a kapcsolódó intézményi gyakorlatok feltérképezése áll, különös tekintettel a műtárgyszállítás sebezhető pontjaira és azok védelmi lehetőségeire.

2 Műtárgyvédelem

Az alapkutatás témája az “Intézményi műtárgyvédelem időszaki kiállítások vonatkozásában”, melynek célja a magyar és nemzetközi intézmények tanulmányozása és összehasonlítása, amely lehetőséget ad a teljes intézményi műtárgyvédelem megismerésére, mind a vagyonvédelmi, mind az állományvédelmi protokollok tekintetében. [2]

A műtárgyak többek között a következő okokból kerülhetnek közgyűjteményi intézményekbe:

Tárolás és kiállítás: Ahol különleges feltételeket teremtenek a műtárgyak megfelelő megőrzéséhez és tárolásához, például megfelelő hőmérsékletet, páratartalmat és világítást biztosítanak a műtárgyak károsodásának vagy idő előtti öregedésének minimalizálása érdekében. Másrészt a megfelelő őrzésvédelem mellett a szükséges tűzvédelmet is biztosítják.

Kutatás és tanulmány: A közgyűjteményi intézmények lehetővé teszik kutatók, történészek, művészek és más szakértők számára a műtárgyak tanulmányozását. A kutatás révén elősegítik a művészeti, történelmi vagy tudományos ismeretek bővítését.

Oktatás és képzés: A közgyűjteményi intézmények oktatási célokra használják a műtárgyakat. Iskolás csoportok, diákok és tanárok látogathatják ezeket a helyeket, ahol a műtárgyakat órák tartására vagy más oktatási formák, például kreatív vagy művészeti órák megvalósítására használják.

Közösség elérése és építése: A közgyűjteményi intézmények a műtárgyakat is hozzáférhetővé teszik a közösség számára, ami erősítheti a kapcsolatot a látogatókkal, és megoszthatja velük üzeneteiket közösségi rendezvények, kulturális programok és kiállítások révén. Végül is a kiállításokon, programokon és rendezvényeken keresztül lehetőséget biztosítanak az embereknek arra, hogy közvetlenül találkozzanak és tanulmányozzák a különböző műtárgyakat.

Kulturális értékek megőrzése: A közgyűjteményi intézmények hozzájárulnak egy adott kultúra vagy korszak művészeti, történelmi és kulturális örökségének megőrzéséhez.

Ezek az okok azt mutatják, hogy az intézmények nemcsak “fizikai tárolóhelyek”, hanem olyan központok is, amelyek elősegítik a kulturális örökség megőrzését, tanulmányozását, oktatását és közösségi részvételét, ami szinte minden esetben speciális és egyedi műtárgyvédelmi megoldásokat igényel.

Az intézményi műtárgyvédelem nem egy standard vagyonvédelmi terv vagy biztonsági protokoll meghatározása, hanem sokkal több annál, hiszen egy kiállításon teljesen más kockázati tényezőkre, veszélyekre és környezeti feltételekre kell felkészülni, hiszen a művészek és kurátorok sajátos értelmezése szerint nemcsak a kiállított műalkotás a kiállítás tárgya, hanem leggyakrabban a műalkotás elhelyezésére szolgáló helyiség egyben az installáció is, azaz ahol a

műtárgy elhelyezkedik, ennek megfelelően a projekt kezdetétől a lezárásáig, azaz ismételt tárolásáig a kiépített műtárgyvédelmi rendszer szerkezetének rugalmasnak kell lennie, elemeit pedig a fenyegetéssel arányosan kell meghatározni. [3]

Sajnos a műtárgyak védelmével kapcsolatos szakirodalom hazánkon kívül, sőt nemzetközi szinten is sok tekintetben hiányos, és a különböző szabályozási és eljárési protokollok is sok esetben nagyon kezdetleges szinten vannak.

3 Közgyűjtemény

A közgyűjtemény, mint gyűjtőfogalom, magában foglalja az állam, a helyi önkormányzatok, a nemzeti kormányok, a köztestületek és a közalapítványok tulajdonában (fenntartásában) lévő vagy általuk létrehozott könyvtárakat, levéltárakat, muzeális intézményeket, valamint a kép- és hangarchívumokat.

Ezek a közgyűjteményi intézmények a műtárgyakat őrzik, amelyek a kultúra, a művészet, a történelem és a nemzeti értékek számos aspektusát felölelik. A közgyűjtemények sokféle formát ölthetnek, beleértve a múzeumokat, könyvtárakat, levéltárakat, galériákat és más hasonló intézményeket, amelyek értékes műtárgyakat és dokumentumokat őriznek meg a jövő generációi számára.

Magyarországon a közgyűjteményi intézményrendszer összesen 1710 intézményt foglal magában, így nem vitatható, hogy hazánkban a közgyűjteményi adattárak száma is jelentős. [4]

A közgyűjteményi tárolás, legyen szó akár "kisebb" helyi múzeumi raktárakról, akár "nagyobb" regionális raktári komplexumokról, egységesen magában foglalja az értékes műtárgyak tárolását, gondozását és megőrzését. Raktárakban vagy depókban történő tárolás során elengedhetetlen a megfelelő környezeti feltételek biztosítása, a megfelelő biztonsági intézkedések megtétele, valamint a gyűjtemények esetleges károsodásának megelőzése.

A közgyűjteményi tárolásnak magában kell foglalnia a készletgazdálkodás, a szervezés és a dokumentáció szabályozását is. Számos szabvány és ajánlás adaptálható az üzleti szektorból, például az ISO 27001. [5]

A tárolásbiztonság a tárolási helyek, a tárgyak és az ott dolgozó személyzet fizikai és szellemi védelmét jelenti. [6] [7] [8] A tárolásbiztonság elsődleges célja az értékes tárgyak, műtárgyak vagy dokumentumok védelme a lopástól, sérüléstől vagy egyéb veszélyektől, a gyűjteménymegőrzés mellett – amely mindig speciális, és megköveteli a műalkotások állapotának figyelemmel kísérését, valamint a műtárgyak megőrzéséhez szükséges konzerválási vagy restaurálási beavatkozások elvégzését.

A tárolásbiztonság magában foglalja az összes olyan intézkedést, amely megelőzi a veszélyeket és kockázatokat, hatékonyan védi az értékeket, és biztosítja a raktárban dolgozó személyzet biztonságát. A biztonsági intézkedések megtervezésében és megvalósításában jellemzően speciális biztonsági és műtárgyvédelmi szakemberek vesznek részt. [9]

A közgyűjtemények tárolása magában foglalja az értékes műtárgyak tárolását, gondozását és megőrzését. A raktárakban vagy depókban történő tárolás során biztosítani kell a közgyűjtemények számára megfelelő környezeti feltételeket, a megfelelő biztonsági intézkedéseket és az esetleges károk megelőzését.

A közgyűjteményi tárolásnak magában kell foglalnia az állományvédelem szabályozását, a rendszerezést és a dokumentálást is. Az intézményeknek figyelemmel kell kísérniük a műtárgyak állapotát, és szükség esetén konzerválási vagy restaurálási beavatkozásokat kell végezniük az anyagok megőrzése érdekében.

Emellett a műtárgyak szállítási útvonalának szakértők általi koordinálása és a végső útvonal elektronikus megosztása is kiberkockázatot jelent, ezért szükséges biztonságos elektronikus levelezés használata, amely aszimmetrikus titkosítást használ.

Ezenkívül a számítógépeken és laptopokon tárolt adatokat mindig titkosított fájlrendszerrel kell védeni, hogy az érzékeny adatok elvesztés vagy lopás esetén se kerüljenek nyilvánosságra.

3.1 Raktárbiztonság

A raktárbiztonság egy olyan fogalom, amely a tárolóterületek, tárgyak és az ott dolgozók fizikai és mentális védelmére utal. A raktárbiztonság elsődleges célja az értékes tárgyak, műtárgyak vagy dokumentumok védelme a lopástól, sérüléstől vagy egyéb fenyegetésektől. A raktárbiztonság számos fontos elemet foglal magában, beleértve a következőket:

Fizikai biztonság: A raktár fizikai biztonsága az épület, a kerítések, az ajtók és az ablakok védelmére vonatkozik. Valamint a raktárterületen belüli hozzáférés és mozgás korlátozására irányuló intézkedésekre.

Biztonságtechnika: Riasztók, jelzőrendszerek, biztonsági kamerák (CCTV), beléptető rendszerek és robotok (humanoid, robotkutya, operátor) használata, valamint biztonsági központ és megfigyelőhelyiség kialakítása.

Tűzvédelem: A tűzvédelem a raktárbiztonság fontos része. Ez magában foglalja a tűzoltó berendezések telepítését, a tűzjelző rendszerek használatát, a tűzoltók képzését és a gyors reagálást tűz esetén. A megfelelő oltási technológia kiválasztása különösen fontos feladat, amelyet egy külön esettanulmányban lehet tárgyalni.

Lopás elleni védelem: a raktár lopásvédelmének részeként fizikai védelmi intézkedések, például záruk, ajtók és riasztórendszerek is alkalmazhatók. Ezenkívül a belső ellenőrzési eljárások, a tárgyak nyomon követése és a rendszeres leltározás is segíti a lopás elleni védelmet. Szükséges egy többszintű biztonsági protokoll kidolgozása, amely kiterjed az alapvető védelemre és az egyes tárgyra vonatkozó kiegészítő védelmekre.

Környezeti feltételek szabályozása: fontos a műtárgyak vagy „érzékeny” tárgyak optimális környezeti feltételeinek fenntartása. Ez magában foglalja a hőmérséklet és a páratartalom szabályozását, a levegőben szálló por elleni védelmet, valamint az UV-sugárzás és egyéb káros hatások elleni védelmet. A jelenlegi energiapolitikai kihívások miatt a fenntarthatóságot és a megújuló energiákat is figyelembe kell venni.

Adatvédelem: a raktárban tárolt adatok és dokumentumok védelme is kulcsfontosságú. Az elektronikus rendszerek, a biztonsági mentések és a hozzáférés-vezérlési lehetőségek segítenek az adatok biztonságban tartásában. Számos szabvány és ajánlás alkalmazható az üzleti szektorban, például az ISO 27001 szabvány.

Megelőző személyi védelem és biztonságtudatossági képzés: A munkavállalók képzése és oktatása a biztonsági eljárásokról és a vészhelyzeti reagálásról elengedhetetlen. A raktári dolgozók személyi védőfelszerelésének biztosítása szintén hozzájárul a fizikai biztonsághoz.

Kiberbiztonság: A kiberbiztonság a digitális raktárakban is kiemelkedő fontosságú. A tárolt adatok védelme és hozzáférhetősége kritikus fontosságú a raktár biztonsága szempontjából.

A raktárbiztonság magába foglal minden olyan intézkedést, amely megelőzi a veszélyeket és kockázatokat, hatékonyan védi az értéktárgyakat és a raktárban dolgozók biztonságát. A biztonsági intézkedéseket általában speciális biztonsági szakemberek és tervezők tervezik és tartják karban [10].

4 Műtárgyak csomagolására kijelölt helyiség

A műtárgyak biztonságos kezeléséhez, szállításához és tárolásához elengedhetetlen egy erre a célra kialakított csomagolóhelyiség. Ez a tér nemcsak fizikai, hanem szakmai választóvonal is a kiállítótér, a raktár és a szállítási folyamatok között. A csomagolás nem történhet a kiállítótérben vagy a raktárban, mivel ezek a terek más funkciókat töltenek be, és nem biztosítanak megfelelő feltételeket az előkészítéshez.

A csomagolóhelyiség lehetővé teszi a műtárgyak nyugodt, ellenőrzött környezetben történő vizsgálatát, állapotuk dokumentálását és szállításra való előkészítését. Itt történik a csomagolóanyagok kiválasztása, az egyedi védelmi

megoldások kidolgozása, valamint a biztonságos és légkondicionált szállítás előkészítése. A helyiségnek alkalmasnak kell lennie a megfelelő hőmérséklet, páratartalom és tisztaság fenntartására, valamint védenie kell a műtárgyakat a fizikai és biológiai káros hatásoktól [11].

A jól megtervezett csomagolóter hozzájárul a műalkotások integritásának megőrzéséhez, a logisztikai folyamatok hatékonyságához, valamint a szakszerű tároláshoz és kiállítási előkészítéshez. Ezért egy ilyen tér megléte és használata elengedhetetlen minden közgyűjteményi intézmény számára [12].

5 Műtárgyak szállítmányozása

A műtárgyak szállítása során kiemelt fontosságú a megelőző megközelítés és az alapos tervezés. A kiállítandó műtárgyak szállításának professzionális előkészítése már a kiállítási koncepció kidolgozásakor meg kell kezdődnie – amikor a kurátor, művészettörténész vagy kiállításszervező meghatározza a témát és a helyszínt. Ez a folyamat nemcsak a logisztikai, hanem az állományvédelmi és biztonsági szempontokat is figyelembe veszi, mivel a szállítás a műtárgyak életciklusának egyik legérzékenyebb szakasza [13].

A műtárgyakat a kijelölt csomagolóhelyiségben készítik elő a szállításra. Innen a gondosan becsomagolt műtárgyak az előre kiválasztott szállítóeszközbe kerülnek, amely lehet egy kisebb zárt jármű, egy légkondicionált teherautó vagy akár egy légi szállításra alkalmas konténer. A szállítás lehet belföldi vagy nemzetközi, de minden esetben elengedhetetlen a megfelelő műtárgyvédelmi követelmények meghatározása: például a stabil hőmérséklet és páratartalom biztosítása, a csomagolás fizikai védelme és a biztonsági előírások betartása. Bizonyos esetekben kuratori kíséretre, biztonsági személyzetre, sőt fegyveres kíséretre is szükség lehet, különösen a nagyon értékes vagy törékeny műalkotások esetében. A felelős döntéshozatal ezen a ponton kulcsfontosságú a műtárgyak integritásának és szakszerű védelmének a biztosításához.

Amikor a műtárgyak megérkeznek a rendeltetési helyükre – legyen az múzeum, kiállítótér vagy raktár –, rendkívül fontos, hogy először egy erre a célra kialakított, biztonságos és légkondicionált helyiségbe kerüljenek. Ez a dedikált tér lehetővé teszi a műtárgyak fokozatos és szakszerű kicsomagolását. Sok esetben nem ajánlott a műtárgyak azonnali kibontása a csomagolásból: szükség lehet egy úgynevezett akklimatizációs időszakra, amelynek során a műtárgy és a csomagolóanyag fokozatosan alkalmazkodik a fogadó tér környezeti viszonyaihoz. Ez az időszak akár két-három napig is eltarthat. Az ilyen helyiségeknek megfelelő feltételeket kell biztosítaniuk az eszközök védelméhez és megőrzéséhez. A biztonsági személyzet mellett az állományvédelmi szakemberek jelenléte is elengedhetetlen a kicsomagolás során. A csomagolás eltávolítása után minden műalkotás állapotellenőrzésen esik át, és csak ezután helyezhető el a kiállítótérben, vagy tárolható a raktárban [14].

6 Különleges szállítmányozási formák és a fenntarthatóság

A műtárgyszállítmányozásnak két különösen érzékeny és összetett formája a légi szállítás és a fegyveres kíséret. Mindkét eset különleges biztonsági és védelmi intézkedéseket igényel, de fontos, hogy ezek a megoldások a fenntarthatósági szempontokat is figyelembe vegyék. A légi szállítás fenntarthatósága, valamint a fegyveres kíséret logisztikai és erőforrásigénye komoly kérdéseket vet fel. Vizsgálatuk egyre inkább napirenden van a műtárgyszállítmányozás jövőjével kapcsolatos kutatásokban, így a műtárgyak szállításának fenntarthatóságának kérdése – különös tekintettel a légi és a fegyveres kíséretre – a közeljövőben külön kutatási irányként is megjelenhet.

Összefoglalás

A kutatás egyértelműen kimutatta, hogy a műtárgyvédelmet nem lehet pusztán vagyonvédelmi vagy állományvédelmi kérdésnek tekinteni, hanem ez egy összetett, multidiszciplináris rendszer, amelyben a vagyonvédelem, az állományvédelem, a gyűjteménymegőrzés, a logisztikai tervezés, a fenntarthatósági szempontok és a kulturális örökség megőrzése egy stratégiai keretrendszerben összefonódik. Az elemzések megerősítették, hogy a jelenlegi intézményi gyakorlatok számos hiányossággal küzdenek – különösen a preventív műtárgyvédelmi tervezés, a fenntartható tárolási és szállítási megoldások, valamint a biztonsági protokollok harmonizálása területén.

A kutatás első fázisa, amely a közgyűjteményi intézmények működését és biztonsági infrastruktúráját elemezte, feltárta, hogy egy potenciális hibrid tárolási modell jelentheti a leghatékonyabb és legbiztonságosabb megoldást mind a hazai, mind a nemzetközi közgyűjteményi intézmények számára. Ez a modell ötvözi a helyi raktárak gyors, költséghatékony működését a regionális központok fejlett biztonsági infrastruktúrájával, miközben lehetővé teszi a fenntartható energiafelhasználás és a környezeti stabilitás megvalósítását is.

A kutatás második fázisa – amely a szállítás műalkotásvédelmi aspektusaira összpontosított – megerősítette, hogy a szállítás a műtárgyak életciklusának egyik legkritikusabb szakasza. A csomagolás, az átszállítás, a klimastabilitás és az információbiztonság mind olyan kockázati tényezők, amelyek jól összehangolt intézményi protokollokat igényelnek. Az eredmények rávilágítanak arra, hogy a szállításban részt vevő szakemberek – kurátorok, restaurátorok, biztonsági szakértők és logisztikai koordinátorok – közötti együttműködés elengedhetetlen a biztonságos és fenntartható műtárgymozgatáshoz.

A kutatás egyik fő következtetése, hogy az intézményi műtárgyvédelem csak akkor lehet hosszú távon hatékony, ha a megelőzés, a kockázatértékelés és az adaptív biztonsági tervezés teljes mértékben integrálódik a napi intézményi működésbe. Ez magában foglalja a személyzet rendszeres biztonságtudatossági

képzését, a modern biztonsági technológiák (pl. CCTV, beléptető rendszerek, intelligens érzékelők) alkalmazását, valamint a digitális infrastruktúra védelmét.

A jövőbeli kutatási irányok közé tartozik a műtárgyszállítás fenntarthatósági szempontjainak mélyebb vizsgálata, különös tekintettel a légi szállítás és a fegyveres kíséret vonatkozásában, valamint ezek energia- vagy erőforrásigényére. Továbbá elengedhetetlen a nemzetközi gyakorlatok feltérképezése és adaptálása a hazai intézményi kontextusba, különös tekintettel a kisebb közgyűjteményekre, amelyek gyakran korlátozott erőforrásokkal működnek, miközben törekszenek a megfelelő műtárgyvédelem biztosítására.

Összefoglalva, az intézményi műtárgyvédelemet nem szabad egyszerű múzeumi részfolyamatnak tekinteni, hanem ez egy stratégiailag jelentős, integrált rendszerszintű tevékenység. A kutatás eredményei hozzájárulhatnak egy olyan szakmai keretrendszer kidolgozásához, amely biztosítja a műtárgyak hosszú távú fizikai, környezeti és digitális védelmét, amely a fenntarthatóság elveit is magában foglalja.

Köszönetnyilvánítás

Az EKÖP-24-KDP-4 számú projekt a Kulturális és Innovációs Minisztérium Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatásával, a 2024-2.1.2 – Egyetemi Kutatói Ösztöndíj Program – Kooperatív Doktori Program finanszírozásában valósult meg.



A cikk megírásához nagy segítséget nyújtott az Óbudai Egyetem Biztonságtudományi Szakkollégiuma.

Források

- [1] 1997. évi CXL. törvény a muzeális intézményekről, a nyilvános könyvtári ellátásról és a közművelődésről 1. sz. mellékletének o.) pontja
- [2] László Lőrincz, Tamás Berek: The Role of Closed-Circuit Television in Institutional ArtWork Protection as a Subsystem of Smart City, Interdisciplinary Description of Complex Systems 21(4), pp 391. (2023).
- [3] Act CXL of 1997 on Museums, Public Libraries and Public Culture, Annex 1, point o.)
- [4] L. Lorincz, G. Kiss, A. Oszi: A Comparative Scoping Study of Local and Regional Museums Storage Solutions, IEEE TechDefense Conference, Napoli 2024.
- [5] ISO standard 27001, Information security, cybersecurity and privacy protection Information security management systems. 2022.

- [6] Z. László, What rules should be taken into account for the storage of goods in warehouses, 2008. National Institute for Vocational and Adult Education and Training
- [7] N. Hofstra, B. Petkova, W. Dullaert, G. Reniers, és S. de Leeuw, „Assessing and facilitating warehouse safety”, *Saf. Sci.*, vol. 105, pp. 134–148, jún. 2018, doi: 10.1016/j.ssci.2018.02.010.
- [8] F. Halawa, H. Dauod, I. G. Lee, Y. Li, S. W. Yoon, és S. H. Chung, „Introduction of a real time location system to enhance the warehouse safety and operational efficiency”, *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 224, pp. 107541, jún. 2020, doi: 10.1016/j.ijpe.2019.107541.
- [9] F. Halawa, H. Dauod, I. G. Lee, Y. Li, S. W. Yoon, és S. H. Chung, „Introduction of a real time location system to enhance the warehouse safety and operational efficiency”, *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 224, pp. 107541, jún. 2020, doi: 10.1016/j.ijpe.2019.107541.
- [10] Lőrincz László: Intézményi műtárgyvédelem: bevezetés a közgyűjteményi raktározásba, Mérnöki Szimpózium a Bánkiban (ESB 2023)
- [11] L. P. Klenz, „Sustainable museum storage buildings with low energy consumption: three models from Denmark”, *Riksantikvarieämbetet*, ápr. 2023, [Online]. Elérhető: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1752684/FULLTEXT01.pdf>
- [12] „4 Ways to Optimize Your Museum Artifact & Art Storage”, *McMURRAY STERN*. [Online]. Elérhető: <https://mcmurraystern.com/4-ways-to-optimize-your-museum-artifact-art-storage/>
- [13] „The Logistics and Challenges of Transporting Priceless Masterpieces”. [Online]. Elérhető: <https://artbusinessnews.com/2024/04/the-logistics-and-challenges-of-transporting-priceless-masterpieces>
- [14] „Fine Art Logistics: Techniques for Safe Transport, Preservation, and Protection of Valuable Artworks”. [Online]. Elérhető: <https://en.overpack.it/news/fine-art-logistics-techniques-for-safe-transport-preservation-and-protection-of-valuable-artworks.html>

The importance of distributed intelligence traffic control systems in secondary railway transport

Zoltan Papp

Department of Instrumentation and Automation, Kando Kalman Faculty of Electrical Engineering, Obuda University, Budapest 1084, Hungary, 17. Tavaszmezo str., papp.zoltan@uni-obuda.hu

Dr. Jozsef Papp

Department of Instrumentation and Automation, Kando Kalman Faculty of Electrical Engineering, Obuda University, Budapest 1084, Hungary, 17. Tavaszmezo str., papp.jozsef@uni-obuda.hu

Abstract: One of the biggest challenges in modernizing secondary line rail transport is the high investment cost of safety and traffic control systems. The currently used centralized train control systems (e.g. Electra II., GSM-R) require significant infrastructure and maintenance costs, which are uneconomical on low-traffic, low-load railway lines. The research examines the applicability of a distributed intelligence, decentralized traffic control system. In this system each network element has its own processing unit and decision-making authority. It has modular structure and operates without a central computer, relying on the cooperation of autonomous devices. The RFID and LORA-based communication architecture enables real-time vehicle identification, monitoring of track element status, and local fault management. The economic advantage of the distributed intelligence structure is that it significantly reduces cabling, installation, and maintenance costs while increasing system reliability and scalability. The proposed solution offers a cost-effective and safe alternative to traditional centralized train control systems, especially for branch line railways, promoting the preservation of sustainable regional rail transport.

Keywords: Distributed intelligence, Decentralized railway control, LoRa communication, RFID-based train identification, Fail-safe systems, Secondary railway modernization.

1 Introduction

Secondary rail transport plays a significant role in the transport network, especially in the case of low-traffic, regional lines. However, the cost of safety and traffic management systems, as well as the expected reliability and “fail-safe” operation, are particularly challenging in the modernisation of these lines. In order to improve the efficiency of side-line rail transport, it is therefore essential to adopt innovative technologies.

A conceptual framework for a ‘distributed intelligence decentralised traffic management system’ in which each network element possesses autonomous processing and decision-making capabilities and the network elements interact directly with one another. Conventional centralised traffic management and train control systems entail high investment and operational costs. [1] (largely due to extensive cabling, installation requirements, and maintenance demands.) On the other hand, it is worth exploring alternative cost-effective solutions for sidelines, which nevertheless guarantee high reliability and fail-safe operation. The essence of the decentralised distributed intelligence architecture is that the system is not built on a single central unit, but on intelligent subsystems embedded in trackside elements (e.g. switches, signals, rolling stock) that communicate with each other – e.g. vehicle identification, status monitoring, local error management. This structure reduces installation and maintenance costs – less cabling, fewer central units – while enhancing flexibility and scalability. [2] The use of a smart, decentralised architecture in rail transport has evolved from a theoretical concept into a viable engineering approach.

It should be emphasised that the aim of the ‘distributed intelligence traffic control system’ is not to fully replace the high-cost systems developed for high traffic main lines, but to provide a safe, reliable, cost-effective alternative for secondary line traffic. This approach can contribute to the preservation and revitalisation of regional rail transport, especially in areas where transport demand is lower and where traditional systems would be too uneconomical.

2 Core Concepts and Technical Foundations Distributed Intelligence and Decentralised Control

Understanding the technical foundations of the decentralised, distributed intelligence rail traffic management system is key for the application on secondary railway lines to be successful. ‘Distributed intelligence’ means that each element of the system, such as track section occupation sensors, switch controls, signalling controllers, vehicle identification units, is not merely actuators and sensors, but also possess own information processing and evaluation capacity and even decision-making powers. These decentralised units can communicate with each other in order to maximise traffic safety, train paths and track capacity, without the need for a centralised computer at regional or network-wide level [1]. Decentralised systems, made up of modular smart units, have already proved their worth in industrial control and, because of their scalability and flexibility, they are increasingly considered for use in railway applications. The decentralised structure allows decisions to be taken locally on the basis of current conditions, which means local real-time decision-making in traffic management. The principle of decentralised control reduces reliance on the central computer, thus increasing the reliability of the system.

It is of utmost importance that each decision point is redundant, meaning that there should be a backup control module, a separate communication path, and the system is designed to bring the system to a ‘safe state’ in the event of failure of any component. For example, a typical fail-safe mechanism ensures that loss of communication with other system elements triggers an automatic ‘stop’ command, halting the train or enforcing speed restrictions. In Hungarian: instead of a balanced state, it moves to a lower operational level, but there should be no unsupervised continuous movement. However, the failure of a system component is a clear demonstration of the inherent resilience of decentralised architectures, as if one module falls, the others can continue to function, so there will not be a complete system shutdown from a single error. [3]

When designing the system, design considerations must ensure that the components communicate according to uniform protocols, whether communication is wired or wireless. Functions such as vehicle identification, track occupancy detection, and status monitoring all rely on high-integrity data for which accuracy and latency are critical parameters. In addition, the system should be able to be integrated with the rail regulatory and safety standards currently in force: signalling systems, switches/points, automatic train protection (ATP), etc. Research indicates that such systems have the potential to reduce congestion and enhance safety, while system integration can be flexibly adapted to diverse railway infrastructures. [22] However, it must be emphasised that the decentralised architecture alone is not enough. The vulnerability and fault

tolerance of the system components, including the underlying safety mechanisms, must also be properly designed. [4]

RFID- and LORA-Based Communication Architecture Communication and Sensing

By integrating technologies such as RFID for vehicle identification and LORA/LoRaWAN for wireless communication, these systems establish lightweight, long-range, and low-energy data links between trains, trackside equipment, and stations. LoRaWAN, in particular, supports the low-power, wide-area networking essential for cost-effective extension to remote and rural lines [5]. RFID tags on locomotives and rolling stock deliver continuous real-time location and identification data to the distributed control network. [5] LORA-enabled devices installed on trains and infrastructure elements (such as signals, switches, and track circuits) allow for bidirectional data communication about track status, maintenance requirements, and alarm conditions, even in locations with limited power and connectivity infrastructure. [5] In cases of GPS or GSM failures, LoRaWAN-based multi-hop localisation offers a robust fallback mechanism, reinforcing operational reliability on secondary or poorly connected lines. [6]

These probabilistic models have been mathematically and empirically validated on operational lines such as the Bologna-Vignola railway, proving the system's resilience to interference and environmental fluctuations, thereby assuring continuity of signaling functions under even adverse conditions. [6] In a domestic pilot project (MÁV Development Centre, 2024) the system measured the status of track elements and the position of trains via the LORA networks, resulting in significant cost and energy savings compared to conventional cable-based systems. The network was able to process incoming data locally and thus react rapidly to operational anomalies. As an international example, Swiss SBB operates a similar architecture, which significantly improved traffic flows and reduced the number of failures (SBB Annual Report, 2023).

However, RFID technology can fulfil multiple functions in the railway environment: it is primarily employed for vehicle identification, but it can also support track element identification (e.g. switch module identifier). RFID devices may be connected to railway equipment or trackside objects and thus integrated into a real-time tracking system. [7]

LORA technology (Long Range) can be a positive choice for secondary lines, as it offers a long communication range and low energy consumption and requires only modest infrastructure. For example, trackside control-and-detection modules can function as LORA nodes that communicate with each other and with the central or regional surveillance system as required. This enables the collection and transmission of status data (track occupancy, switch positions, and module indicators) and distributed decision-making across the system elements.

Economic and Operational Advantages Cost Savings

The introduction of a decentralised distributed intelligence system is not merely a technical issue – its economic and operational benefits are also significant, especially in the context of secondary-line rail transport. Distributed intelligence minimises the need for expensive and failure-prone central cabling networks, extensive signal control rooms, and dedicated communication backbones. [1] In such systems, much of the intelligence as well as failure detection and basic recovery actions are moved to the edge, where they can be handled by modular, replaceable devices [5]. Implementation on secondary lines has demonstrated significant reductions in up-front installation and ongoing maintenance costs, largely due to:

- Reduced length and complexity of cabling needed
- Reduced power-infrastructure investment for network backbone equipment
- Simplified and scalable maintenance, as individual components can be upgraded or replaced without affecting the whole system [5]

It is estimated in practice that a reduction of up to 30 % to 50 % of the cost of cabling, the construction of a central control station, licences and long-term maintenance charges on a sideline could be achieved. In addition, easier extensions make the installation of future developments significantly more cost-efficient (e.g. new sensors, automation).

The advantage of a decentralised system is also operational flexibility: as each section acts as a smart module, the maintenance or modification of that section can be partially done independently. For example, if a section of line is closed for maintenance purposes, the other sections can continue to operate – the entire line is not forced into shutdown due to the failure of the central system. In addition, the system can be easily expanded: the addition of new sensors, communication modules does not require a new central control station or large-scale infrastructure – it can simply be installed as a new section-level control module. [8]

3 Reliability and Scalability

Distributed systems inherently provide higher reliability and resilience against local failures: one processing node or segment suffers a fault, its adjacent nodes can often compensate or re-route trains as needed, without catastrophic system downtime [9]. This node autonomy also means that the system is more readily scalable – new secondary lines or connection points can be added by

simply integrating additional smart modules, without redesigning the entire network's logic. [22]

Secondary lines are characterised by low turnover and a slower return on investment. This means that only technologies that are cost-effective and easy to operate can be considered. The decentralised system is well suited to this, because each section is operational on its own and does not need to be built on large central facilities. Thus, the owner or operator of the line can install a safety solution at a lower risk. In addition, if modules can be installed in a modular manner, e.g. in a subscription model ('sensor module monthly fee'), the initial investment may be lower. This may be particularly important in regional or municipally owned railway lines.

Modernising rail transport is no longer just about traffic management and safety, but increasingly about automation and energy efficiency. Automation can be interpreted at several levels: vehicle control (e.g. automatic driving, GoA), traffic control, maintenance automation. The decentralised architecture fits well, as local modules are able to make automatic decisions, e.g. speed reduction, state control, error response, without always requiring central decisions. [13]

Reducing energy use is an important aspect – especially when the line has low traffic and revenues are limited. A decentralised system supports energy efficiency by using smart controls – such as signals, lighting and switch settings only when necessary; sensors enter sleep mode, communication is optimised (e.g. less frequent data transmission). In addition, smart system components supporting local decision-making lead to less data being transferred to the centre, requires less grid energy and results in lower latency. [2] Automation should not only cover train movements – it also has great potential at system monitoring and maintenance level. Smart sensors support predictive maintenance through continuous state monitoring: if an anomaly is indicated by a track element (e.g. an abnormal control state), the local module gives an immediate signal and may even take a mitigation step (e.g. imposing a restriction or holding the train). [14]

Studies of modular distributed-interlocking systems for railway stations have shown that logical unit partitioning and minimised communication overheads are essential for ensuring traffic safety and optimising throughput [18]. Real-world pilot implementations and mathematical models evaluating LoRaWAN-based railway signalling on secondary lines have validated this technology stack's ability to maintain high reliability for vehicle identification and track state management, even under interference and challenging environmental conditions

[6]. Automation and modular intelligence are also aligned with broader trends in transport digitalisation and the shift towards “smart” railway operations, aimed at improving safety and reducing costs across passenger and freight segments – without sacrificing operational flexibility [10].

4 Interfacing with Renewable Energy and IoT Integration

Decentralised and smart railway control aligns well with the trend of integrating IoT and renewable energy solutions for broader railway infrastructure, supporting not only digitalised signaling but also more energy-autonomous operation and resilience against network-wide failures [11]. Distributed edge devices in railway signaling systems increasingly incorporate IoT protocols and edge computing, enabling local data fusion and real-time analytics without heavy reliance on cloud resources or central computer resources [12].

The core of the IoT is the systematic connection of sensors, controllers and network devices, with data collection and real-time communication. In rail transport, this takes the form of infrastructure monitoring (e.g. track section occupation, switches, temperature, vibration), rolling stock identification (RFID) and train tracking. [4]

Edge computing means that data processing takes place close to the device or location where the data is generated – not all data needs to be sent to the cloud or to a central server. This reduces latency, grid load and increases the robustness of the system. [2] [15]

Data security, encryption of communications, device identification and system protection against cyber-attacks are particularly important for IoT and edge architectures. (DoS attacks and risk of misuse of data). [4] Furthermore, the decentralised architecture helps to avoid a single point of failure – the system components continue to function, even if the central communication is interrupted.

Smart monitoring and security support are one of the most advanced layers of a distributed intelligence system. In this chapter, I look at how AI

technologies (machine learning, image processing, anomaly detection) can be used on railway secondary lines with practical examples and references.

AI (machine learning, deep learning) can recognise patterns that are not traditional rules-based systems. For example, detection of foreign objects on the track: the ‘Intelligent Railway Foreign Object Detection: The Semi-supervised Convolutional Autoencoder Based Method’ shows how convolutional autoencoders are used to detect unauthorised objects on the track without the need to know predefined categories. [16]

Railway infrastructure is increasingly equipped with sensors: rail condition, vibration, temperature, position of switch mechanism. Algorithms running on Edge-AI platforms (e.g. FPGA-based systems) can indicate errors in real time (up to 88.9% of faulty rails can be identified). [17] Thus, in the sideline system, the modules not only communicate and control but also continuously monitor the conditions and predict errors or anomalies with AI algorithms. For example, modules can recognise if the switch position has changed or the engine current has risen persistently – and trigger pre-warning maintenance. AI algorithms allow local modules to automatically determine safe conditions and switch to error handling mode when needed.

Advanced Wireless Control and Self-Triggering Mechanisms

The following levels of intelligent distributed systems involve the use of wireless control and self-management mechanisms: automation functions that autonomously change mode, prevent errors or react to faults based on device conditions or ambient conditions. A self-management mechanism implies that the device detects its own state, such as a rise in motor current, an increase in rail vibration, an incorrect contact-position signal, and independently initiates the next step: e.g. imposing a speed limit, holding the train, or automatic migration to a secure mode. [14] The security protocol is a critical issue for such automated functions: self-management should always be deterministic – i.e. detection, decision-making and implementation must be reliable and fully documented. The system must have an event log and be auditable, in particular with regard to railway licensing requirements. Moreover, the reliability of communication channels (radio links), redundancy, interference protection and physical protection of assets (e.g. vandal-resistant enclosures) are important.

Conclusions

Distributed-intelligence, decentralised control using RFID and LORA architectures provides a practical, cost-effective, and robust solution for secondary-line railway modernisation, especially in low-traffic or resource-constrained environments. These systems demonstrably reduce investment and operational costs, improve fault resilience, and offer scalable, future-proof infrastructure for evolving transport demands. [6] [18] [5] [9] [10] [11] [12] [19] [20] [21] It is important to highlight that in practical implementation, not only the technology, but also engineering design, operational strategy, redundancy structure and certification process are important. The decentralised architecture allows each network component to have its own intelligence, thus reducing dependence on the central controller, increasing system redundancy and reducing the risk of single-point failure. The RFID and LORA-based communication architecture is well-applied in a secondary-line environment: low-cost, easy to install and operate while allowing vehicle identification, track element monitoring and local decision-making. Lower infrastructure costs, scalability, operational flexibility, and increased availability all contribute to a more sustainable secondary rail network. IoT and edge computing architectures enable the implementation of a network of sensors and modules, with real-time data, local decisions and rapid response, while AI-enabled monitoring and self-triggering mechanisms ensure that the system does not merely follow conditions passively, but also actively responds to technical failures and security incidents.

The harmonisation of railway safety and communication standards and the use of new wireless communication technologies (5G/FRMCS) may be necessary in order for such decentralised systems to be widely deployed. It is important to highlight that predictive maintenance and optimal traffic management with AI algorithms further increase economic sustainability. However, where IoT devices and network modules are increasingly used, the risk of cyber-attacks also grows, and appropriate protection mechanisms are needed.

Authors' Declaration

The authors acknowledge the use of the European Union's *Multilingual Services* for linguistic revision purposes. The service was employed exclusively to correct English-language inaccuracies and improve textual clarity.

References

- [1] URL: < https://en.wikipedia.org/wiki/Centralized_traffic_control > (27.10.2025)
- [2] URL: < <https://www.mdpi.com/1424-8220/24/17/5633> > (27.10.2025)
Edge Integration of Artificial Intelligence into Wireless Smart Sensor Platforms for Railroad Bridge Impact Detection (2025.10.27)
- [3] URL: < <https://etasr.com/index.php/ETASR/article/view/631> > Design and Simulation of a Decentralized Railway Traffic Control System | Engineering, Technology & Applied Science Research (2025.10.27)
- [4] URL: < <https://tst.duit.in.ua/index.php/tst/article/view/397> > "The security of IoT systems in railway transport | Transport systems and technologies" (2025.10.27)
- [5] G. Vernazza, R. Zunino: A distributed intelligence methodology for railway traffic control, In: IEEE Transactions on Vehicular Technology, Aug 1, 1990, 39, 263-270.
- [6] Liu, Y., Neri, A., Ruggeri, A., & Vegni, A.: A MPTCP-Based Network Architecture for Intelligent Train Control and Traffic Management Operations. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2017, 18, 2290-2302.
- [7] URL: < <https://www.intertechrail.com/power-behind-railid> > The Power Behind RAIL-ID (27.10.2025)
- [8] URL: < <https://www.capgemini.com/insights/expert-perspectives/smarter-rail-safety-at-the-edge> > Smarter rail safety at the edge - Capgemini (2025.10.27)
- [9] Jia, L., & Zhang, X.: Distributed intelligent railway traffic control based on fuzzy decisionmaking. Fuzzy Sets and Systems, 1994, 62, 255-265.
- [10] Marcelli, E., & Pellegrini, P.: Literature Review Toward Decentralized Railway Traffic Management. IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine, 2021, 13, 234-252.
- [11] A., K., S., A., Roshan, K., S., S., , V., & S, N.: Arduino UNO based Autonomous Train System. Journal of ISMAC. 2025.
- [12] Hassanabadi, H., Moaveni, B., & Karimi, M.: A comprehensive distributed architecture for railway traffic control using multi-agent systems. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2015, 229, 109 - 124.
- [13] URL: < <https://www.railway.supply/en/the-train-automatic-control-system-tacs-management-system/> > The Train Automatic Control System (TACS) management system - Railway Supply (2025.10.27)

- [14] URL: < <https://arxiv.org/abs/2411.02086> > Real-time and Downtime-tolerant Fault Diagnosis for Railway Turnout Machines (RTMs) Empowered with Cloud-Edge Pipeline Parallelism (2025.10.27)
- [15] URL: < <https://www.ijraset.com/research-paper/survey-on-transit-edge-dynamic-task-management-in-collaborative-rail-computing> > Survey on Transit Edge: Dynamic Task Management in Collaborative Rail Computing (2025.10.27)
- [16] URL: < <https://arxiv.org/abs/2108.02421> > Intelligent Railway Foreign Object Detection: A Semi-supervised Convolutional Autoencoder Based Method (2025.10.27)
- [17] URL: < <https://arxiv.org/abs/2408.15245> > An Edge AI System Based on FPGA Platform for Railway Fault Detection (2025.10.27)
- [18] Ghasempour, T., Nicholson, G., Kirkwood, D., Fujiyama, T., & Heydecker, B.: Distributed Approximate Dynamic Control for Traffic Management of Busy Railway Networks. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2019, 21, 3788-3798.
- [19] Bretas, A., Mendes, A., Jackson, M., Clement, R., Sanhueza, C., & Chalup, S. A decentralised multi-agent system for rail freight traffic management. Annals of Operations Research, 2021, 320, 631-661.
- [20] Suciu, D., Dulf, E., & Kovács, L.: Low-Cost Autonomous Trains and Safety Systems Implementation, using Computer Vision. Acta Polytechnica Hungarica. 2024.
- [21] Yıldırım, M.: A Management System for Autonomous Shuttle Freight Train Service in Shared Railway Corridors. International Journal of Civil Engineering, 2021, 20, 273 - 290.
- [22] Tokody Dániel, Schuster György, Papp József: Study of How to Implement an Intelligent Railway System in Hungary, In: Szakál, Anikó (szerk.) SISY 2015: IEEE 13th International Symposium on Intelligent Systems and Informatics : Proceedings September 17-19, 2015, Subotica, Serbia, New York, Amerikai Egyesült Államok : Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) (2015) 329 p. pp. 199-204. , 6 p.

A statikus HAZOP-tól az intelligensig, avagy a fuzzyn keresztül az ACS-FORCE keretrendszerig.

Szén István^{1,2}

1. Óbudai Egyetem, Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar - Elektrofizika Intézet, Hidrogéntechológiák és Ipari IoT Tanszék (HTT), Budapest 1034 Bécsi út 94-96/A, Magyarország, szen.istvan@kvk.uni-obuda.hu

2. Óbudai Egyetem, Egyetemi Kutató és Innovációs Központ - Hidrogén és Hibrid Technológiák Kutatóközpont, 1034 Bécsi út 94-96/A, Magyarország, szen.istvan@kvk.uni-obuda.hu

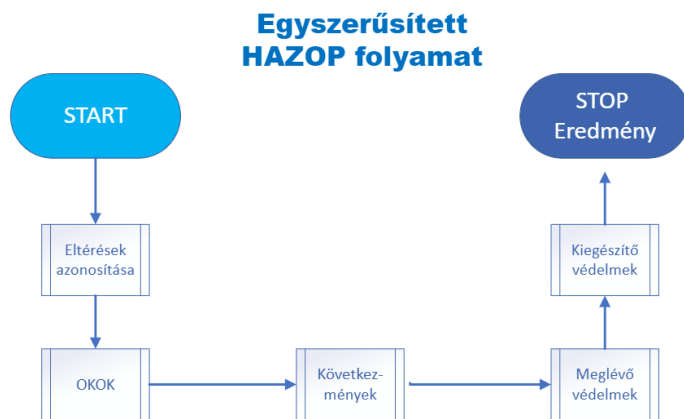
A HAZOP (Hazard and Operability Study) a folyamatbiztonsági elemzések egyik legelterjedtebb és legmegbízhatóbb eszköze, amely a potenciális veszélyforrások és üzemviteli anomáliák azonosítását szolgálja. Hagyományos, statikus megközelítése azonban nem teszi lehetővé a rendszerek működés közbeni, adaptív értékelését. A módszer jellemzően offline módon kerül alkalmazásra, és jelentős humán erőforrást igényel, mivel nagymértékben épít a szakértői csoportok tapasztalatára és szubjektív megítélésére. Kutatásom központi kérdése, hogy a jelenlegi HAZOP-eljárás nem támogatja az on-line, valós idejű döntéshozatalt, és nem biztosít kvantitatív értékelési lehetőséget. Ez a korlátozás különösen problematikus a mai, digitalizált ipari környezetben, ahol a komplex rendszerek megbízhatósága egyre inkább a gyors adatfeldolgozáson és az objektív értékelésen múlik. A valós idejű, kvantitatív megközelítések hiánya nem csupán hatékonyságvesztést okozhat, hanem a biztonsági szint csökkenéséhez is vezethet a nagy kockázatú, összetett üzemekben. Az ipari digitalizáció, az IoT-alapú monitoringrendszerek, valamint a mesterséges intelligencián alapuló elemzési technológiák új lehetőséget kínálnak a HAZOP továbbfejlesztésére. Ezen eszközök integrálása révén a módszer dinamikus, adaptív és részben automatizált formában is alkalmazhatóvá válhat, elősegítve a gyors és megalapozott döntéshozatalt. A hidrogéntechológiák területén ez különösen lényeges, hiszen az üzemi feltételek gyakran gyorsan és nehezen előrejelezhető módon változnak. Ilyen környezetben elengedhetetlen a valós idejű, adatvezérelt és szubjektivitást minimalizáló biztonsági értékelés, amely támogatja a proaktív beavatkozási stratégiákat. Célom, hogy a HAZOP módszertan alapvető erősségeit megőrizve olyan továbbfejlesztett koncepciót dolgozzak ki, amely a hagyományos, tervezési fázisban alkalmazott statikus elemzést dinamikus, on-line folyamatirányító rendszerekbe integrálható formában bővíti ki. Ennek demonstrálására egy mintapélda segítségével bemutatom a HAZOP működését, a fuzzy logika alkalmazási lehetőségeit, a Mamdani-fuzzy megközelítés korlátait, valamint a TSK-fuzzy rendszerek optimalizálását hangyakolónia-alapú (ACO) módszerrel.

Kulcsszavak: hidrogén, biztonság, HAZOP, Fuzzy, metaheurisztika, hangyakolónia

1 Bevezetés

A HAZOP (Hazard and Operability Study) módszertan az 1960-as években az Imperial Chemical Industries vegyipari üzemek összetett biztonsági kihívásainak kezelésére fejlesztette ki [1]. Azóta de facto ipari szabvánnyá vált a nagy megbízhatóságú, veszélyes rendszerek tervezésében. A módszer alapelve a strukturált, rendszeres kockázatelemzés vezetékszavak (guide words) segítségével (például túl magas/alacsony nyomás, túlzott/hiányos áramlás) amelyek az üzemi eltéréseket és potenciális veszélyforrásokat azonosítják.

Azonban a klasszikus HAZOP inherent szubjektivitása, kvalitatív jellege és számítási korlátai komoly akadályokat jelentenek a mai valós idejű, adatvezérelt ipari környezetben [2]. Azonos rendszer különböző szakértői csoportokkal végzett HAZOP-elemzése eltérő kimenetet adhat a csoport tapasztalatától, szubjektív megítélésétől függően. A hidrogéntekológiák fejlődése [3][4] különösen kritikussá teszi a gyorsabb, adatvezérelt kockázatelemzési módszerek szükségességét [5][6].



15. ábra: A HAZOP-folyamatárja [23]

2 Fuzzy logika: Mamdani és Takagi-Sugeno-Kang megközelítések

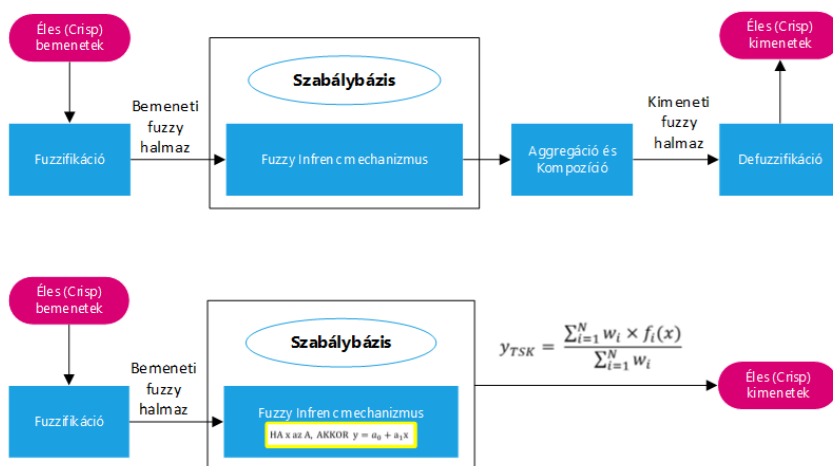
A fuzzy logika Lotfi A. Zadeh 1965-ben megjelent Fuzzy Sets tanulmánya alapján fejlődött ki önálló matematikai módszerré, melyet a szabályozástechnikában és a villamosmérnöki gyakorlatban előszeretettel alkalmazunk [7]. A fuzzy halmazelméleti megközelítés segítségével az elemek egy halmazhoz való tagsága nem kizárólagos (0 vagy 1), hanem fokozatosan értelmezett (0 és 1 közötti folyamatos átmeneti értékkel). Ez az emberi gondolkodáshoz közelebbi

reprezentáció lehetővé teszi a természetes, emberi nyelvben megfogalmazott ismeretek matematikai formalizálását [8].

Az IF-THEN szabályokon alapuló fuzzy következtetési rendszer (Fuzzy Inference System, FIS) működésének fő lépéseit a fuzzifikáció, a szabálybázis, az aggregáció, kompozíció és a defuzzifikáció teszi ki. A fuzzifikáció során a hagyományos, éles (crisp) értékeket fuzzy halmazokhoz rendeljük hozzá, tagsági függvények segítségével. A szabályok az antecedens feltételek alapján aktiválódnak, majd kombinációjukból a végső kimenet áll elő [9].

A fuzzy rendszerek két fő megközelítése az Ebrahim Mamdani által 1975-ben bemutatott Mamdani-fuzzy logika és a Takagi-Sugeno-Kang (TSK) fuzzy logika. A Mamdani-megközelítés a szabályok konzekvens (THEN) részét fuzzy halmazokkal írja le. Egy tipikus Mamdani-szabály: **IF Nyomás IS Magas AND Áramlás IS Alacsony THEN Kockázat IS Nagy**. Ez az eljárás aggregációs és defuzzifikációs lépéseken keresztül konvertálja az eredményt numerikus kimenetűvé [10][11]. Bár szemantikailag jól értelmezhető a módszer, számítási szempontból korlátokba ütközik, különösen nagy mintaszámok esetén.

A TSK fuzzy megközelítés alapvetően különbözik a Mamdani-módszertől. Míg a Mamdani-rendszer fuzzy halmazokat használ a konzekvens részben, addig a TSK explicit, általában lineáris matematikai függvényt helyez: **IF Nyomás IS Magas AND Áramlás IS Alacsony THEN Kockázat = $a_0 + a_1 \cdot \text{Nyomás} + a_2 \cdot \text{Áramlás}$** . Ez lehetővé teszi, hogy a kimeneti értékek közvetlenül számíthatók legyenek az aktivációs fokok súlyozott átlagolásával, anélkül hogy aggregációs vagy defuzzifikációs lépésekre lenne szükség [12][13].

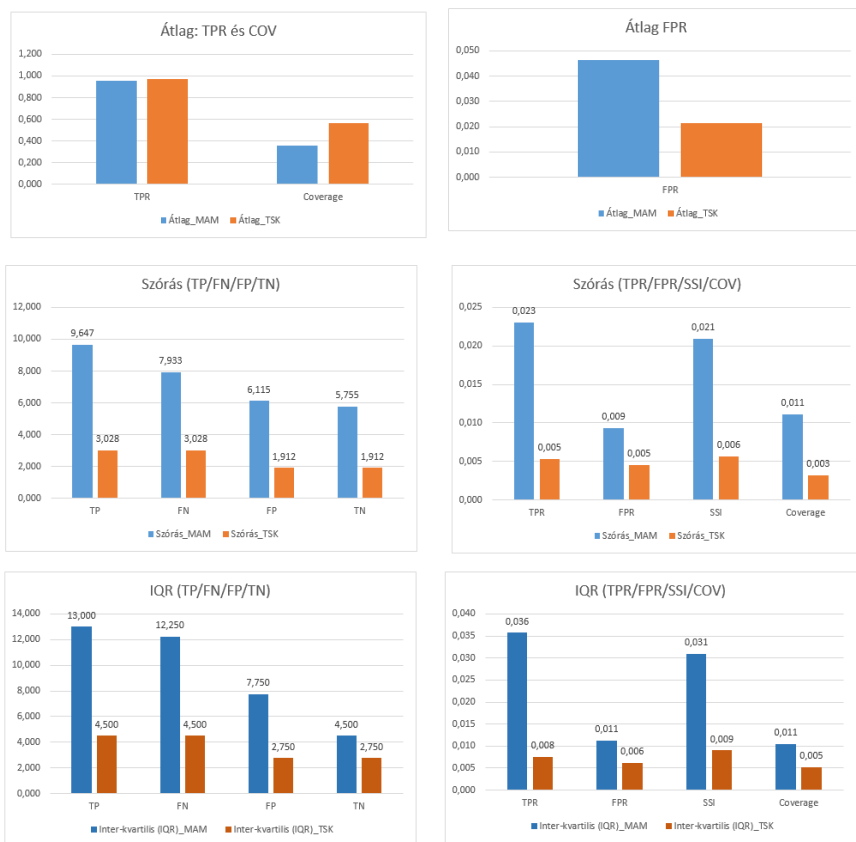


16. ábra: Mamdani és TSK-fuzzy grafikus összehasonlítása [23].

A TSK-fuzzy jelentős előnyöket kínál: (1) a számítási hatékonyság drasztikusan javul; (2) a kimeneti értékek folytonos, így deriválható, (3) a numerikus kimenet

közvetlenül integrálható más adaptív- vagy optimalizációs algoritmusokkal [14][15]. E tulajdonságok napjaink valós idejű, biztonságkritikus alkalmazásainak követelményeivel vannak összhangban.

Doktori kutatási feladataim során, az empirikus validációt alkalmazva kiderült, hogy a TSK-modell a Mamdani-modellhez képest lényegesen jobb teljesítményt nyújt. 100 000 adat feldolgozásánál a TSK-modell átlagos futási ideje 0,31 másodperc volt, míg a Mamdani-modell 2,89 másodpercet vett igénybe – amely közel tízszeres feldolgozási sebességkülönbséget jelent. A kockázatdetektálási mutató (TPR) 2,2%-kal, míg a tévesriasztási arány (FPR) 54%-kal javult. E különbségek statisztikailag szignifikánsak ($p < 0,001$) [23].

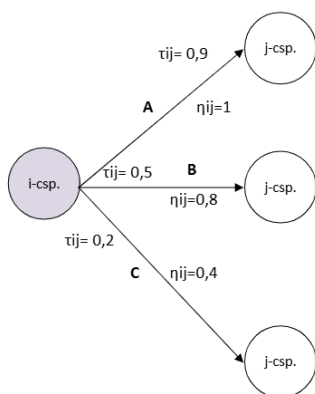


17. ábra: Validációs mutatók - Mamdani és TSK összehasonlítás [23]

3 Az ACS-FORCE keretrendszer: bioinspirált optimalizáció

A TSK-fuzzy logika által kínált előnyök teljes mértékben csak akkor érvényesülnek, ha a konzekvens tagban szereplő súlyparaméterek ($a_0, a_1, a_2, \dots$) optimálisan vannak beállítva. A manuális paraméterhangolás nem csak időigényes és szubjektív, hanem összetett, többdimenziós rendszerekben gyakorlatilag kivitelezhetetlen. Ezt megoldandó feladatként, integráltam a TSK-fuzzy rendszert az Ant Colony System (ACS) metaheurisztikus optimalizációs algoritmussal, létrehozva ezáltal az ACS-FORCE keretrendszert (Ant Colony System and Fuzzy Optimization for Real-time Critical Environments) [16][23].

A hangyakolóniák viselkedésének számítógépes szimulációjára épülő ACS algoritmus különösen jól alkalmazható a TSK fuzzy paraméterek optimalizálásához. Az eljárás során mesterséges hangyák a többdimenziós paraméterterben mozognak, feromonnyomok követésével és heurisztikus irányítás alapján keresik az optimális súlyvektor-kombinációkat [17][18][23]. Az algoritmus feromonfrissítési mechanizmusa biztosítja a globális optimalizációt, míg az elhalványuló feromonok elkerülik a lokális optimumokba való beragadást.



$$p_{ij}^k = \begin{cases} \frac{[\tau_{ij}]^\alpha \times [\eta_{ij}]^\beta}{\sum_{l \in N_k^i} [\tau_{il}]^\alpha \times [\eta_{il}]^\beta} & \text{ha } j \in N_k \\ 0 & \text{különben} \end{cases}$$

p_{ij}^k – a k -adik hangya valószínűsége arra, hogy $i \rightarrow j$ lépést választ
 i – a jelenlegi csomópont, ahol a hangya van
 j – a célcsomópont, amelyre a hangya lépni szeretne
 $l \in N_k^i$ – az összes elérhető célcsomópont az i -ből kiindulva (a k -adik hangya számára)
 τ_{ij} – az adott paraméterértékhez tartozó feromonintenzitás
 η_{ij} – heurisztikus érték, mennyire jó az $i \rightarrow j$ él azonnali szempontból
 $\alpha, \beta \in \mathbb{R}^+$ – súlyparaméterek
 N_k^i – a még látogatható csomópontok száma a k -adik hangya számára

Az ACS-FORCE célfüggvénye négy mutatóra támaszkodik: a valós pozitív detektálási arány (TPR), a tévesriasztási arány (FPR), a lefedettség (Coverage) és a biztonsági érzékenység index (SSI) [19] [23]. Ezek normalizált kombinációja teszi lehetővé, hogy az operatív stratégiák (pl. biztonsági maximalizálás vs. költségminimalizálás) formalizálható paraméterzáson keresztül megvalósíthatók legyenek.

Az ACS-FORCE integrációval elért eredmények szignifikánsak: a TSK-modellhez képest a TPR 0,92%-kal nőtt, az FPR 9,5%-kal csökkent, míg a

lefedettség 42%-kal javult [20][23]. A biztonsági érzékenység 2,71%-kal növekedett, ami rzkenyebb és stabilabb biztonsági viselkedésre utal. E javulások statisztikailag szignifikánsak, különösen az FPR és Coverage terén ($p < 0,001$) [23].

4 Következtetések és alkalmazási perspektívák

A klasszikus HAZOP módszertan és a modern fuzzy logika, valamint bioinspirált optimalizáció integrációja új dimenziókat nyit a biztonságkritikus ipari rendszerek kockázatelemzésében. Az ACS-FORCE keretrendszer gyakorlati alkalmazása lehetővé teszi:

- A valós idejű, adatvezérelt kockázatelemzést on-line üzemmódban, amely drasztikusan csökkenti a manuális elemzésre fordított időt;
- A szubjektivitás és emberi torzítások redukálását matematikailag megalapozott, reprodukálható döntéseken keresztül;
- A számítási hatékonyság megőrzésétől a TSK-fuzzy logika révén, amely 10-szerese a Mamdani-módszernek;
- Az operatív stratégiák flexibilis paraméterzálását az ACS-FORCE cél függvényen keresztül, lehetővé téve a biztonsági vs. költség prioritások eseti hangolást.

A tanulmányban bemutatott módszer különösen alkalmas hidrogéntechológiai létesítmények, valamint más biztonságkritikus ipari rendszerek (vegyipar, energetika, feldolgozóipar) on-line monitorozásához. További kutatási irányok közé tartozik más metaheurisztikus algoritmusok teljesítménybeli összehasonlítása, valamint a keretrendszer validálása valódi hardveres rendszereken egy kísérleti laboratóriumi infrastruktúrán.

Stratégia	Domináns súlyparaméterek	Jellemző
Biztonságmaximalizáló	$\alpha \gg \beta, \gamma, \delta$	minden kockázatot fel kell ismerni, még akár úgy is, hogy lesznek téves riasztások
Költségminimalizáló	$\beta \gg \alpha, \gamma, \delta$	a téves riasztások számát csökkenti, azért, hogy ne legyen indokolatlan leállítás
Robosztus működés	α és γ magas	a modell széles lefedettségű és pontos, téves riasztás lehetséges és nem mindenre reagál élesen
Érzékenységorientált	$\delta \gg \alpha, \beta, \gamma$	nagyon kis eltérésekre is élesen reagál

18. ábra: Üzemeltetési stratégiák [23]

Forrásjegyzék

- [1] IEC 61882, Hazard and operability studies (HAZOP studies) – Application guide, 2016.
- [2] H. Zhang, B. Zhang, and D. Gao, A new approach of integrating industry prior knowledge for HAZOP interaction, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 86, 2023, Art. no. 105005.
- [3] Szén István, Hidrogén alapú energetika, In: Óbudai, Egyetem (szerk.) XII. Óbudai Energetikai Konferencia, Budapest, Magyarország : Óbudai Egyetem (2017) 132 p. pp. 91-102. , 12 p.
- [4] Szén István, Hidrogén-energetika 1. rész, Energiatárolási célok és lehetőségek, a hidrogén értéklánc, *ELEKTROTECHNIKA* 116 : 9-10 pp. 28-32. , 5 p. (2023)
- [5] K. Hartmann et al., Hydrogen component leak rate quantification for system risk and reliability assessment, 9th Int. Conf. Hydrogen Safety ICHS 2021, Edinburgh, UK, Sept. 2021.
- [6] Oxford Institute for Energy Studies, Review of Hydrogen Leakage along the Supply Chain, *Energy Transition*, no. ET41, Nov. 2024.
- [7] L. A. Zadeh, Fuzzy sets, *Information and Control*, vol. 8, no. 3, pp. 338-353, Jun. 1965.
- [8] J. M. Mendel, Fuzzy Logic Systems for Engineering: A Tutorial, *Proceedings of the IEEE*, vol. 83, no. 3, pp. 345-377, 1995.
- [9] Detreki A. és Szilvik L., Fuzzy rendszerek, ELTE Eötvös Kiadó, Budapest, 2011.
- [10] J. J. Jassbi et al., A comparison of Mamdani and Sugeno inference systems for a space fault detection application, in *Proc. World Automation Congress WAC*, Budapest, Hungary, Jul. 2006, pp. 1-8.
- [11] Fazekas L., Fuzzy rendszerek alapjai, Akadémiai Kiadó, Budapest, 2006.
- [12] C.-C. Chen and Y.-T. Liu, Enhanced Ant Colony Optimization with Dynamic Mutation for TSK-Type Fuzzy System Design, *Computational Intelligence and Neuroscience*, vol. 2018, Article ID 9485478, 2018.
- [13] H. Nobahari and S. H. Pourtakdoust, Optimization of fuzzy rule bases using continuous ant colony system, in *Proc. 1st Int. Conf. on Modeling, Simulation and Applied Optimization ICMSAO*, 2005, Paper No. 243.
- [14] C.-F. Juang, C.-W. Hung, and C.-H. Hsu, Rule-based cooperative continuous ant colony optimization to improve the accuracy of fuzzy system design, *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 22, no. 4, pp. 723-735, Aug. 2014.

- [15] M. Dorigo and L. M. Gambardella, Ant Colony System: A Cooperative Learning Approach to the Traveling Salesman Problem, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 1, no. 1, pp. 53-66, Apr. 1997.
- [16] R. J. Kuo, B. S. Wibowo, and F. E. Zulvia, Application of a fuzzy ant colony system to solve the dynamic vehicle routing problem, *Applied Mathematics and Modelling*, vol. 40, nos. 23-24, pp. 9990-10001, Dec. 2016.
- [17] C. Blum, Ant colony optimization: A bibliometric review, *Physics of Life Reviews*, vol. 51, pp. 87-95, Dec. 2024.
- [18] H. R. J. Solukloei et al., A fuzzy-HAZOP-ant colony system methodology to identify combined fire and explosion hazards, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2023.
- [19] M. Shokouhifar, FH-ACO: Fuzzy heuristic-based ant colony optimization for virtual network function placement, *Applied Soft Computing*, vol. 107, p. 107401, Aug. 2021.
- [20] W. Hu et al., All-Optical Implementation of the Ant Colony Optimization Algorithm, *Scientific Reports*, vol. 6, p. 26283, 2016.
- [21] J. Ahn and D. Chang, Fuzzy-based HAZOP study for process industry, *Journal of Hazardous Materials*, vol. 317, pp. 303-311, 2016.
- [22] Y. Yousofnejad, F. Afsari, and M. Eshaghi, Dynamic risk assessment of hospital oxygen supply system by HAZOP and intuitionistic fuzzy, *PLoS One*, vol. 18, no. 2, Feb. 2023.
- [23] Szén István, Óbudai Egyetem-Biztonságtudományi Doktori Iskola, Doktori értekezéstervezet (2025. szeptember 19.), Budapest

Hydrogen Incident Severity Indicator (HISI), az új hidrogénspecifikus eseményskála.

Szén István^{1,2}

1. Óbudai Egyetem, Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar - Elektrofizika Intézet, Hidrogénteknológiák és Ipari IoT Tanszék (HTT), Budapest 1034 Bécsi út 94-96/A, Magyarország, szen.istvan@kvk.uni-obuda.hu

2. Óbudai Egyetem, Egyetemi Kutató és Innovációs Központ - Hidrogén és Hibrid Technológiák Kutatóközpont, 1034 Bécsi út 94-96/A, Magyarország, szen.istvan@kvk.uni-obuda.hu

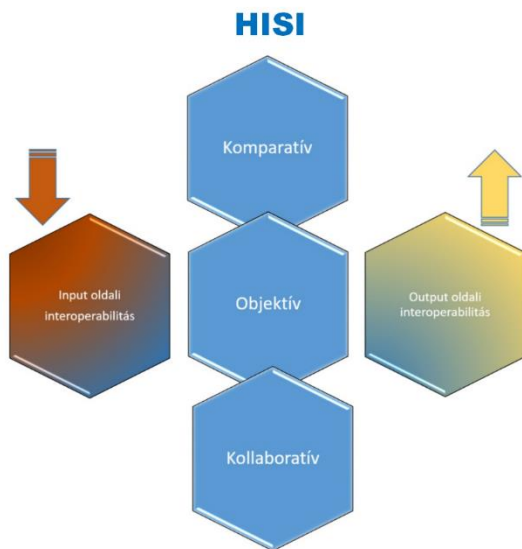
Az elmúlt évtized hidrogénhez köthető eseményei és azok részletes esettanulmányai egyértelműen rávilágítottak arra, hogy a gyors ütemben fejlődő és egyre szélesebb körben alkalmazott hidrogénteknológiák biztonsági eseményeinek dokumentálása, elemzése és rendszerezése jelentős hiányosságokat mutat. A szakirodalmi források áttekintése és az általam végzett lefedettség hiányokra irányuló vizsgálat (gap-analízis) megerősítette ezt a tapasztalatot. Kutatásom alapján jelenleg nem áll rendelkezésre olyan, általánosan elfogadott és többdimenziós súlyossági skála, amely a hidrogénteknológiákhoz kapcsolódó események következetes, teljes körű és objektív osztályozását biztosítaná. A rendelkezésre álló módszerek és modellek – például a Failure Modes and Effects Safety Analysis (FMESA), a Management Oversight and Risk Tree (MORT), az Accidental Risk Assessment Methodology for Industries (ARAMIS), illetve a Hydrogen Component Reliability Database (HyCReD) – jellemzően szűk technológiai fókuszúak, eseti alkalmazásokhoz készültek, vagy csupán komponensszintű értékelésre alkalmasak. Hasonló korlátok figyelhetők meg az olyan nemzetközileg elismert rendszerek esetében is, mint az International Nuclear Event Scale (INES), a European Scale of Industrial Accidents, az Analyse, Recherche et Information sur les Accidents (ARIA) vagy a Hydrogen Incident and Accident Database (HIAD). Ezek a megközelítések nem teszik lehetővé a hidrogénspecifikus események strukturált, következményalapú és súlyossági szempontú értékelését. Bár a HIAD kifejezetten hidrogénhez kapcsolódó eseményeket gyűjt és elemez, egyik lényeges hiányossága, hogy nem rendelkezik formalizált, kvantitatív súlyossági skálával. Kutatásom célja egy olyan új, tudományos alapokon nyugvó súlyossági skála kidolgozása, amely kifejezetten a hidrogénteknológiákhoz kapcsolódó események objektív osztályozását szolgálja. A javasolt rendszer célja, hogy kiegészítse a már széles körben használt ipari eseményértékelési keretrendszereket, miközben biztosítja az interoperabilitást és a kollaboratív adatelemzést mind a bemeneti, mind a kimeneti oldalon. Az új skálaszerkezet lehetőséget teremt az események közötti objektív összehasonlításra, ezáltal hozzájárulva a hidrogénipar biztonsági kultúrájának fejlesztéséhez és a megelőző intézkedések hatékonyságának növeléséhez.

Kulcsszavak: hidrogén, biztonság, HISI, eseményskála, incidens, empirikus validáció

1 Bevezetés

A hidrogéntechológiák objektumai, tűz- és robbanásveszélyes, rendkívül komplex biztonsági profillal rendelkeznek. A hidrogén alacsony gyulladási energiája (0,017 mJ levegőben), széleskörű gyulladási tartománya (4–75 V/V), nagy diffúziós képessége és szabad szemmel szinte nem látható lángja olyan kockázati profilt eredményez, amely a hagyományos ipari eseményosztályozási rendszereknek nem felel meg [1][2][5][9][10][11][12].

Az Energiaátmenet jelen szakaszában, amelyet az Európai Zöld Megállapodás és a nemzeti stratégiák (pl.: NEKT – Nemzeti Energia és Klímaterv) előírnak, a hidrogén alkalmazása egyre szélesebb körben terjed [3][4][5][6][7][8]. Az elmúlt évtizedben több dokumentált hidrogénbaleset is, (pl.: 2019-es Kjørbo-i (Norvégia), Santa Clara-i (USA) és Gangneung-i (Dél-Korea)) rávilágított arra, hogy az ipari események osztályozási rendszerei nem megfelelően kezelik a hidrogénspecifikus kockázatokat [3][13][14]. A meglévő eseményriport és -osztályozási rendszerek, - mint az INES (International Nuclear Event Scale), az ARIA (Analyse, Recherche et Information sur les Accidents), az ESIA (European Scale of Industrial Accidents) és a HIAD (Hydrogen Incident and Accident Database) – jelentős korlátokkal küzdenek. Ugyan a HIAD kifejezetten hidrogénincidenseket gyűjt, de nem rendelkezik formalizált, kvantitatív súlyossági skálával. Ezen tények jelentik a fő motivációt arra, hogy egy új, hidrogénspecifikus, multidimenzionális eseményskálát definiáljak [13][14][16][17]. A skála fundamentális alapjait az 1. ábrán szemléltetem.

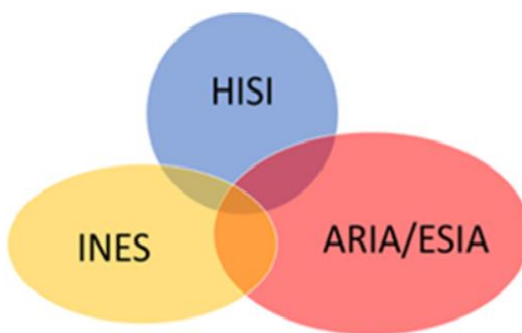


19. ábra: A HISI-modell tervezési alapjai [12][13].

2 A meglévő eseményosztályozási rendszerek hiányosságai

A nemzetközi, szisztematikus szakirodalomkutatás alapján kijelenthetem, hogy a hidrogénspecifikus incidensek értékeléséhez szükséges multidimenzionális megközelítés jelenleg hiányzik az ipari gyakorlatban. A FMESA (Failure Modes and Effects Safety Analysis), a MORT (Management Oversight and Risk Tree) és az ARAMIS (Accidental Risk Assessment Methodology for Industries) szűk technológiai fókuszúak, és nem alkalmazhatók általánosan a hidrogénesemények értékelésére [13][15][18][19][22]. Az INES skála, bár nemzetközileg elfogadott a nukleáris iparban, nem értelmezhető hidrogénincidensekre. Az ESIA és ARIA adatbázisok, noha ipari baleseteket gyűjtönek, nem tartalmaznak hidrogénspecifikus paramétereket [13][19][22].

A tudományos gap-analízis eredményei azt mutatják, hogy a jelenlegi rendszerek alulreprezentálnak olyan kritikus dimenziókat, mint: (1) a hidrogén, kompatibilitási problémái, (2) a fémek ridegedése; (3) az alacsony gyulladási energiával összefüggő sajátosságok; (4) az emberi és menedzsment tényezők szerepe; (5) a kriogén folyamat (cseppfolyós hidrogén esetén); (6) az áramló gáz diffúziója következtében kialakuló veszélyzónák [9][10][11][12]. Ezek a hiányosságok indokoltá teszik egy új, kifejezetten hidrogénre kidolgozott skála megalkotását [11][12][13].



20. ábra: A HISI komplementer szerepe és integrálhatósága más rendszerekhez [12][13]

3 A Hydrogen Incident Severity Indicator szerkezete és dimenziói (HISI (Szén 2025))

A HISI egy hétszintű, négydimenziós pontozási alapú rendszer, amely az alábbi dimenziókat (3. ábra) integrálva értékeli a hidrogénincidenseket:

- **emberi hatások** (személyi sérülések, halálesetek);
- **környezeti hatások** (talaj-, víz- és légszennyezés, hidrogénkibocsátás);
- **fizikai kár** (vagyon kár, infrastrukturális károk TNT-ekvivalencia alapján);
- **műszaki meghibásodások** (kritikus biztonsági funkciók elvesztése, szisztematikus hibák) [12][13].

Minden dimenzió 0–5 pontig terjed, ahol a magasabb érték súlyosabb következményt jelez.

A HISI súlyossági szintjei logaritmikus hatásszempléttel rendelkeznek, hasonlóan az INES skálához. Az HISI-1 a legkevésbé súlyos eseményt, az HISI-7 pedig a katasztrofális baleset kategóriáját reprezentálja. A skála ordinális jellegű, biztosítva, hogy a szintek között egyértelmű sorrendiség van. Az összes dimenzióra adott pontszámok összege adja az HISI-összpontszámot, amely alapján a szintdefiníciós táblázat segítségével meghatározható az esemény súlyossági kategóriája [12][13].



21. ábra: A HISI-skála dimenziói [12][13]

4 Empirikus validáció és esettanulmányok

A HISI-skála tudományos megalapozottságának igazolásához empirikus validációt végeztem el. Az empirikus validáció célja a skála gyakorlati működésének ellenőrzése, valamint a következetesség értékelése. A kiválasztott esettanulmányok széleskörűen reprezentálják a hidrogénincidensek különféle típusait, országokat és létesítménytípusokat.

A validáció során három reprezentatív esetet analizáltam: (1) a Kjørbo-i eset (2019. június 10., Norvégia – hidrogéntöltőállomási tüzeset, mérsékelt infrastrukturális kár, HISI-2); (2) a Santa Clara-i eset (2019. június 1., USA – tartálykocsi robbantás és tüzeset, közepesen súlyos kár, HISI-3); (3) a Gangneung-i laborrobbanas (2019. május 23., Dél-Korea – laboratóriumi detonációs katasztrofális szintű kár, HISI-6) [12][13][23][24]. Ezek az esetek eltérő kockázati profilokat mutatnak, lehetővé téve a HISI szenzitivitásának és diszkriminációs képességének validálását. Az esettanulmányok besorolása során konzisztenciaanalízist végeztem el Cronbach-alfa módszerrel. A számítások eredménye Cronbach- $\alpha = 0,957$, amely a skála belső konzisztenciáját igazolja (elfogadható tartomány: 0,7–0,75; kitűnő: $> 0,9$) [12]. Ez a magas érték azt mutatja, hogy a HISI dimenziói koherensen működnek együtt, és stabil empirikus megalapozottságot biztosítanak.

5 Szenzitivitásvizsgálat és robusztusság

A HISI-skála robusztusságának és stabilitásának ellenőrzésére szenzitivitásvizsgálatot végeztem a One-at-a-Time (OAT) módszer alkalmazásával. E módszer révén az egyes dimenziókat egyenként módosítjuk egy előre meghatározott lépésközzel, és megfigyeljük, hogy az adott bemenet változása milyen mértékben befolyásolja a végső besorolást. Jól tervezett skála esetén az apró módosítások csak mérsékelten hatnak az összpontszámra, míg kritikus határértékek mellett a skála kellő érzékenységgel reagál [12]. A szenzitivitásvizsgálat eredményei azt mutatják, hogy a HISI-skála mérsékelt és megfelelő re-szenzitivitással rendelkezik. Kisebb perturbációk (± 1 pont bármely dimenzióban) a legtöbb esetben nem okoznak szintváltást, azonban a kritikus határértékek közelében a skála képes megkülönböztetni a súlyosság finomabb megváltozásait. Például a Kjørbo-esetben (alappontszám: 6 = HISI-2) egy pont növekedés még HISI-2-ben marad (7 pont), míg egy pont csökkentés szintén HISI-2-ben helyezi az esetet. A határértékeken túlmutató változások azonban kategóriaváltást eredményeznek, amely demonstrálja a skála finomhangolásait és döntéstámogatási képességét.

6 Alkalmazási perspektívák, nemzetközi harmonizáció és következtetések

A HISI-skála alkalmazási köre jól definiált, de nyitott a jövőbeli fejlesztésekre. Közvetlenül alkalmazható az ipari, kriogén, szállítási és laboratóriumi hidrogéntechológiai infrastruktúrára [3][5][8]. Nem csupán a statikus alkalmazások közvetett támogatására, hanem a dinamikus on-line monitorozáshoz kapcsolódó döntéstámogatási rendszerekbe is integrálható. A HISI-skála

interoperábilis más nemzetközi rendszerekkel, nem helyettesíti őket, hanem kiegészítő, hidrogénspecifikus modulként működik [12][13].

Jogi és szabályozási szempontból a HISI alátámaszthatja a Seveso III irányelv, az eMARS Major Accident Reporting System és az OSHA-PSM alkalmazását hidrogén-specifikus környezetekben. A skála integrálható a nemzeti és nemzetközi biztonsági adatbázisokba, támogatva a statisztikai trendek elemzését, az oksági minták felismerését és a megelőző intézkedések hatékonyságának értékelését [12][13]. Hosszú távon a HISI alapú, központilag koordinált hidrogénincident-adatbázis empirikus tudásbázissá válhat, amely informálja a szabályozó, ipari és tudományos közösséget.

Összegzésül, a Hydrogen Incident Severity Indicator egy új, tudományosan megalapozott, multidimenzionális eseményskála, amely kitölt egy szignifikáns kutatási rést a hidrogénipar biztonsági dokumentációjában. A HISI-skála objektív, összehasonlítható és nemzetközileg harmonizálható besorolást tesz lehetővé, ezzel hozzájárulva a hidrogénteknológiák biztonságos és fenntartható fejlődéséhez [12][13].

Forrásjegyzék

- [1] Agrawal, H., & Raghu, S. (2019). Hydrogen safety aspects and hazards. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(36), 19484-19500.
- [2] Ustolin, F., et al. (2021). A review of hydrogen vehicle incidents and accidents by country. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(54), 27867-27891.
- [3] Szén, István, GH2 - Green hydrogen energy in the light of sustainability, In: Kolcun, M; Kurimsky, J; Kolcunova, I (szerk.) *PROCEEDINGS OF THE 9TH INTERNATIONAL SCIENTIFIC SYMPOSIUM ON ELECTRICAL POWER ENGINEERING (ELEKTROENERGETIKA 2017)*, Kosice, Szlovákia : Technical University of Kosice (2017) pp. 556-560. , 4 p.
- [4] Ervin, Rác ; István, Szén, GH2 – Green Hydrogen: Hydrogen Energy in the light of sustainability (2017), Előadás, *ELEKTROENERGETIKA 2017*. International Scientific Symposium on Electrical Power Engineering, Stará Lesná, Szlovákia, September 12-14., 2107.,
- [5] Szén István, Hidrogén alapú energetika, In: Óbudai, Egyetem (szerk.) *XII. Óbudai Energetikai Konferencia*, Budapest, Magyarország : Óbudai Egyetem (2017) 132 p. pp. 91-102. , 12 p.
- [6] Istvan, Szen ; Ervin, Racz, Use of the Power Line Communication System (PLC) at Low Voltage (0.4 kV) Noisy Electrical Networks – Introducing a New Concept at Power Quality *RENEWABLE ENERGY & POWER QUALITY JOURNAL RE&PQJ : RE&PQJ-10* pp. 1735-1740. Paper: 823 , 6 p. (2012).

[7] Szén, István ; Dr. Janáky, Csaba ; Bakos, Imre ; Dr. Endrődi, Balázs ; Pintér, László ; Koncz, Bence, A bükkábrányi naperőmű megújuló áramtermelését hasznosító innovatív energiátároló technológia fejlesztése.

[8] Szén István, A hidrogén jelentősége a megújuló energiaforrások integrációjában valamint szerepe a fenntartható energetikában és a „zöld iparban”. In: Temesvári, Zsolt; Wühl, Tibor; Molnár, György (szerk.) XXXVIII. Kandó Konferencia 2022 - Kiadvány kötet Budapest, Magyarország : Óbudai Egyetem, Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar (2022) 419 p. pp. 69-79. , 11 p.

[9] Szén István, Hidrogén-biztonság: Balesetek kvantitatív elemzése és biztonságközpontú, új tervezési módszerek fejlesztése , 1 p. (2023), XXXIX. Kandó Konferencián elhangzott előadás és absztrakt.

[10] Szén, István ; Rácz, Ervin ; Bakosné, Diószegi Mónika, Hidrogénüzemek, új és komplex kockázatértékelési rendszere: Új tervezési irányelvek a hidrogénipari létesítmények biztonságának fokozása érdekében, In: Wühl, Tibor (szerk.) KVK Habilitációs és PhD Workshop Minikonferencia : Kiadvány kötet, Budapest, Magyarország : Óbudai Egyetem, Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar (2024) 124 p. pp. 92-97. , 6 p.

[11] Hidrogénbiztonság: Balesetek kvantitatív elemzése és biztonságközpontú, új tervezési módszerek fejlesztése. In: Molnár, György; Temesvári, Zsolt; Wühl, Tibor (szerk.) XXXIX. Kandó Konferencia 2023, Budapest, Magyarország : Óbudai Egyetem (2024) 420 p. pp. 44-49. , 6 p.

[12] Szén István, Óbudai Egyetem-Biztonságtudományi Doktori Iskola, Doktori értekezéstervezet (2025. szeptember 19.), Budapest

[13] Szén, István; Bakosné Diószegi, Mónika ; Rácz, Ervin, Hidrogénteknológiák biztonsági osztályozása: a HISI-modell koncepciója és empirikus validációja, BIZTONSÁGTUDOMÁNYI SZEMLE 7 : 3 pp. 113-128. , 16 p. (2025)

[14] Gáti-Kiss, Dániel ; Bakos, Imre ; Szén, István, Hidrogénbekeverés-projekt az OPUS TIGÁZ Zrt.-nél, H₂ - HIDROGÉN HÍRLEVÉL : A MAGYAR HIDROGÉN ÉS TÜZELŐANYAG-CELLA EGYESÜLET HÍRLEVELE 2025 : 2025/1 p. Március (2025)

[15] Merilo, E. J., et al. (2019). Hydrogen safety: Lessons learned and challenges ahead. Safety Science, 131, 104934.

[16] Hydrogen Incident and Accident Database (HIAD). Retrieved from <https://h2-hiad-prod.s3.amazonaws.com/> (accessed 2025).

[17] Ewan, B. C. R., & Allen, R. W. K. (2005). A figure of merit assessment of selected hydrogen production processes. International Journal of Hydrogen Energy, 30(8), 809-817.

[18] Failure Modes and Effects Safety Analysis (FMESA) – IEC 60812:2018.

- [19] European Commission. (2020). ARIA – Analyse, Recherche et Information sur les Accidents. Retrieved from <https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/>
- [20] Kikukawa, S., et al. (2021). Hydrogen storage systems for fuel cell vehicles: A review. *Journal of Power Sources*, 507, 230311.
- [21] Dincer, I., & Acar, C. (2015). Review and evaluation of hydrogen production methods for better sustainability. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(25), 7099-7111.
- [22] International Nuclear Event Scale (INES). IAEA Technical Reports Series No. 340. Vienna: IAEA, 1992.
- [23] Pfoertner, H., & Thierry, F. (2019). Investigation report: Hydrogen filling station incident in Kjørbo, Norway. Norwegian DSB Report.
- [24] California State Fire Marshal. (2019). Incident Report: Hydrogen Trailer Explosion, Santa Clara County.
- [25] Cronbach, L. J. (1951). Coefficient alpha and the internal structure of tests. *Psychometrika*, 16(3), 297-334.
- [26] Saltelli, A., et al. (2019). *Sensitivity analysis in practice: A guide to assessing scientific models*. Wiley.
- [27] Seveso III Directive (2012/18/EU) – Guidelines on the European Major-Accident Hazard Management.
- [28] OSHA Process Safety Management (PSM) Standard, 29 CFR 1910.119.
- [29] International Energy Agency (IEA). (2022). *The Future of Hydrogen – Seizing Today's Opportunities*. IEA Publications.

A hidrogén szerepe az energiabiztonság növelésében a megújuló energiaforrások integrációja mellett

Sárdy Kata Eszter¹, Szén István^{1,2,3}

1. Óbudai Egyetem, Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar, Budapest 1084
Tavaszmező u. 15-17., Magyarország, sardykata23@gmail.com

2. Óbudai Egyetem, Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar - Elektrofizika Intézet,
Hidrogéntechnológiák és Ipari IoT Tanszék (HTT), Budapest 1034 Bécsi út 94-
96/A, Magyarország, szen.istvan@kvk.uni-obuda.hu

3. Óbudai Egyetem, Egyetemi Kutató és Innovációs Központ - Hidrogén és Hibrid
Technológiák Kutatóközpont, 1034 Bécsi út 94-96/A, Magyarország,
szen.istvan@kvk.uni-obuda.hu

A hibrid energiarendszerek megbízhatósága és fenntarthatósága egyre meghatározóbb szerepet tölt be a modern energiagazdálkodásban és a klímaváltozás elleni küzdelemben. A hidrogénalapú, hibrid rendszerek lehetőséget kínálnak a megújuló energiaforrások – elsősorban nap- és szélenergia ingadozásából adódó problémák, a hálózati stabilitás és az energiatárolás kihívásainak mérséklésére. Az Európai Hidrogénstratégia (2020) és a RePowerEU (2022) a hibrid energiarendszerek fejlesztését helyezi előtérbe, támogatva a zöldhidrogén-termelést, a villamosenergia- és gázpiac integrációját, valamint az Európai Unió 2050-es klímasemlegességi céljainak elérését. A Magyar Nemzeti Hidrogénstratégia (2021) a hazai energiarendszerben a hibrid rendszerek szerepét a megújuló alapú hidrogéntermelés, az ipari- és közlekedési alkalmazások, valamint a tárolási és konverziós technológiák – pl.: Power-to-Gas (PtG) – bevezetésében látja. Tanulmányunk vizsgálja a környezeti, gazdasági és technológiai összefüggéseket, különös tekintettel az elektrolízis és üzemanyagcella-technológiák költségsökkenésére, a jogi és szabályozási keretek fejlődésére, valamint hazai és regionális lehetőségekre, együttműködésekre. Az elemzés rávilágít, hogy a hidrogénalapú hibrid energiarendszerek kulcsszerepet játszhatnak a rugalmas, karbonsemleges és biztonságos energiahálózatok kialakításában Európában és Magyarországon egyaránt. Jelen cikkünkben, a kutatás bizonyos fejsúlyos területeit tudjuk bemutatni, így fókuszáltan foglalkozunk a a hidrogén, adaptív és rugalmassági funkcióival a nagy PV-penetrációjú energiarendszerek kontextusában, valamint bemutatjuk a hidrogén szektorszintű alkalmazási lehetőségeit (energia-, közlekedés-, ipar-, hőellátás és kémiai szektor).

Kulcsszavak: hidrogén, energiabiztonság, adaptivitás, PV-penetráció, szektor-integráció, hálózati rugalmasság.

5 Bevezetés: Energiaátmenet

Az energiabiztonság szempontjából biztonságos ellátórendszer, modern értelmezésében a megbízható, fenntartható és gazdaságos energiaellátást szimultán képes biztosítani [1][2][3]. A (1) megbízhatóság (reliability); (2) fenntarthatóság (sustainability); (3) gazdaságosság (affordability). Az Európai Zöld Megállapodás (Green Deal) és az azt megvalósító RePowerEU stratégia 2050-ig a szén-dioxid-semlegességet írja elő, amely a megújuló energiaforrások erőteljes expanziójára és az energiaszektor szoros integrációjára épít [4][5][7].



22. ábra: Mervadó EU-direktíva [2][5][7] forrás:
https://commission.europa.eu/topics/energy/repower_eu_en

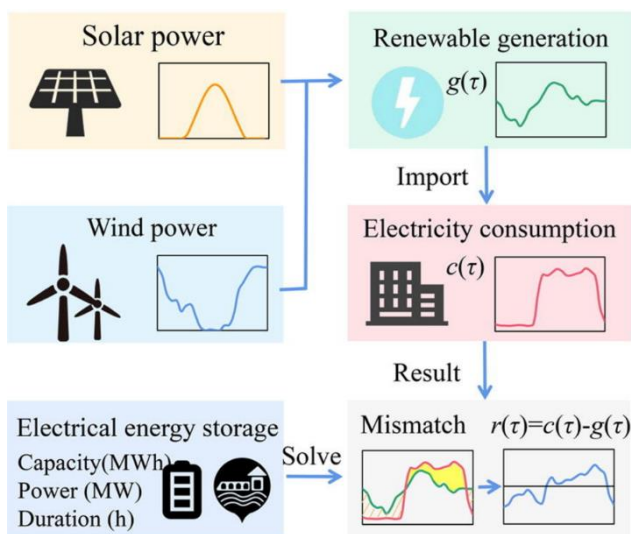
6 Adaptivitás és rugalmasság nagy PV-penetráció mellett

A magas PV-penetrációjú (ez igaz bármely időjárásfüggő energiatermelő esetén) rendszerek alapvető problémáját az energiatermelés és a fogyasztás időbeli eltérése (temporal mismatch) valamint a szezonális fluktuáció (seasonal variation) adja.[6] A nyári középnapokon a PV-termelés a rendszer teljesítményének 50–80%-át elérheti, míg este, éjjel és télen szinte nulla. Ez a napi görbe és az éves minta szimultán kezelendő kihívásokat okoz:

- “Ramp-rate problémák”: az ún. “duck curve” (kacsagörbe) jelenség során délután a PV-termelés drasztikusan visszaesik, a hálózati frekvencia csökken és a konvencionális erőművek turbulens terhelésváltozásoknak vannak kitéve [3][6][14][33][40].
- Szezonális eltérések: a tél–nyár közötti energiamennyiség-eltérés a PV esetén 6–8:1 arány is lehet, ami hosszú tárolási kapacitást igényel [8][15][16][17][33][40].

- Hálózati inercia csökkenése: a szinkron generátorok csökkenő száma (helyüket inverterek veszik át) rövidített tranziens stabilitást (transient stability margin) eredményeznek [6][9][10][14][28][29][33][40].
- Költségingadozások: a nagy PV-termelés időszakaiban az energiaár a nulla közeli értékre esik, míg az energiadeficit (sötét, szélszél) időszakban az ár exponenciálisan növekszik (price volatility) [6][11][28][29].

Az adaptivitás biztosításához tradicionális megoldások energiabiztonság szempontjából (konvencionális erőművek, nem tárolható vezérelt terhelés-löketés) nem elégségesek. A rendszer rugalmassága négy pillérre támaszkodik: (A) aktív, rövid-periódusú tárolás (akkumulátorok, hidromechanikai tárók); (B) inter-szektor rugalmasság (P2G, elektromobilitás, hő-puffer); (C) nemzetközi energiacserek és szomszédos hálózati összeköttetések és (D) szezonális energitárolási technológiák [12][14][16][16].



23. ábra: az energiatermelés és a fogyasztás időbeli eltérése (temporal mismatch) [32].

7 A hidrogén mint adaptív megoldás, a Power-to-Gas és a szektorintegráció.

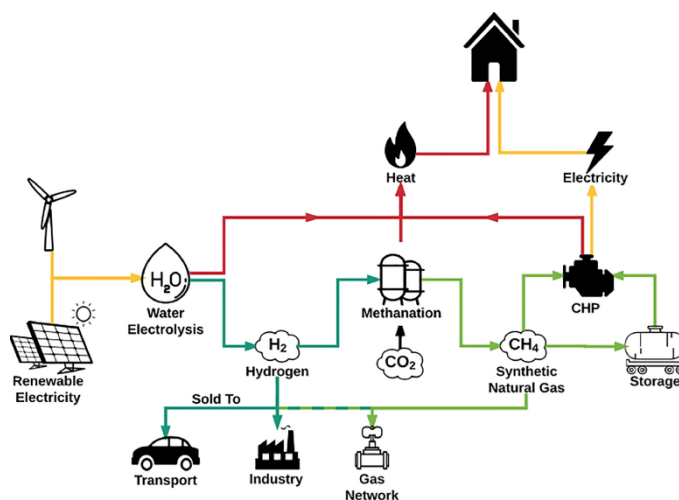
A hidrogén az energiabiztonság és adaptivitás kontextusában egy széleskörűen alkalmazható, szektorintegráló energiavektor [13][14][15].

A hidrogén előnyei:

- Hosszú-periódusú, ún. szezonális energiatárolás: A Power-to-Gas (P2G) technológia révén az elektrolízis révén a megújuló energiaforrásból származó villamos energiát, kémiai-vegyi úton, hidrogén (zöldhidrogén) formájában tároljuk. Lehetőségként később akár tovább alakítjuk ammóniává vagy szintetikus üzemanyaggá. A nagytávolságú szállítás vagy a közlekedési szektorban történő felhasználás ezáltal elérhetővé válik, miközben a tároláson kívül különböző szektorokat is összekapcsolhatunk [16][33][34][35][40].
- Szektor-integráció: A hidrogén képes a villamosenergia-szektor, az ipari szektor, a közlekedési szektor és a hőellátás szektorát összekötni, ezáltal megvalósítva egy nagy, integrált energiarendszert, mely diverzitása révén fokozza a biztonságot és nagymennyiségű, kiegyenlített hidrogénigénye kapcsán növeli a gazdasági stabilitást és a hidrogén értékének fajlagos csökkentéséhez vezethet [4][14][22][23][26][28][40].
- Decentralizáció: A hidrogénelőállítás (elektrolízis) optimalizálásával, közvetlen PV/W (nap és szélenergia) kapcsolat létrehozásával egy decentralizált energiagazdálkodás építhető ki (pl.: energiaközösségek) [29][36][37][38][39][40]
- Rugalmasság nyújtása: Az elektrolizáló berendezés terhelése 0–100% között gyors változtathatóságot kínál, így az energiafelesleget vagy-deficit kezelésére ideális eszköz [29][30][37][38][39][40]

A P2G-folyamat során az elektrolízis révén a villamos energia, hidrogén formájában kémiai energiává alakul át, ami szükség esetén felhasználható [14][41][42]:

- fűtésre: célszerűen magas hőmérséklet, ipari folyamatok üzemanyagaként (vaskohászat) [5];
- a közlekedésben: üzemanyag-cellás járművek (FCEV), hidrogénüzemű robbanómotorok (ICE) (Toyota Mirai vagy MAN) [5];
- Szabályozói villamosenergiává konvertálható: hidrogén égetésére alkalmas gázturbina. (Mátrai Erőmű - Ansaldo GT26) [5];
- Kémiai szintézis alapanyaga (ammónia, szintetikus üzemanyagok, metanol) [5][23][27][28][34][35]



24. ábra: P2G folyamat [41]

8 Hidrogén felhasználási lehetőségei az energiabiztonság kontextusában

4.1 Energiatárolás és csúcsergia-kiegyenlítés

A hidrogén elsősorban szezonális és hosszúperiódusú tárolásra alkalmas. Az energiamérlegből adódó szezonális deficit (különösen a téli félévben) konvencionális méretezésű akkumulátor alapú tárolók mellett kezelhető a P2G-hidrogén és az azt követő visszaalakítás révén [19]. Az “round-trip efficiency” ~50–60% körüli, amely nagyléptékű szezonális tároláshoz a jelenlegi technikai fejlettség mellett elfogadható, a hosszú távon ez javulni fog [14][26][27][31][33][39][40].

4.2 Közlekedési szektor elektromobilitása

A hidrogén-üzemanyagcellás járművek (Fuel Cell Electric Vehicles – FCEV) egy kiépítendő, de fenntartható alternatívát nyújtanak a tisztán elektromos járművek mellett, különösen a nehéz közlekedésben (kamionok, buszok) és a repülésben [5][17]. A hidrogén-infrastruktúra (töltőállomások) az energiagazdálkodás rugalmasságához is hozzájárul, mivel időjárás-függetlenül működhet, ezzel jelentős segítséget nyújthat a villamosenergia-rendszer szabályozásában [3][36][37][38][39][40].

4.3 Ipari alkalmazások és magas hőmérséklet-igényes folyamatok

Az acél-, cement- és vegyipar energiaigényes folyamatai (redukció, pirolízis) jelenleg fosszilis üzemanyaggal (jellemzően földgázzal) működnek. A zöld hidrogén ezekben az alkalmazásokban a karbonmentes termelés kiváló alapja [5][6][14][18]. Az EU ambiciózus céljai között szerepel az ipari szektor 30–50%-os dekarbonizációja 2030-ig a hidrogén révén.

4.4 Hőellátás (fűtés, meleg vízellátás)

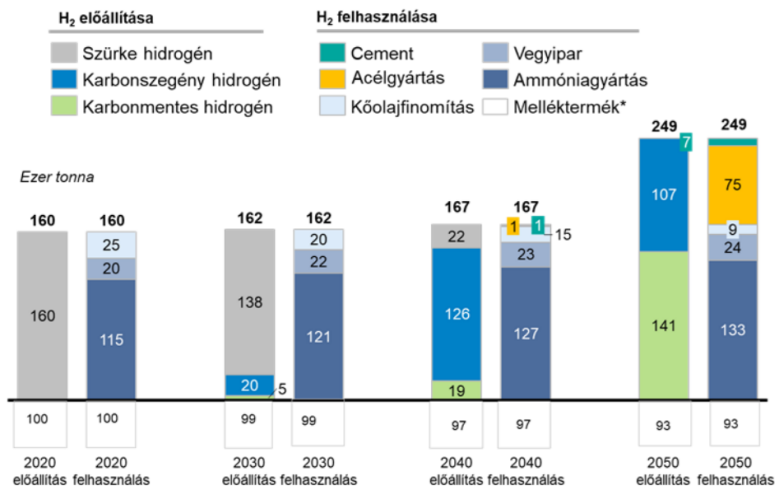
A hidrogén égetése vagy üzemanyag-cellás konverziója hőt termel. A meglévő gázvezeték-hálózatba (akár 10–20% hidrogénnel) keverve, vagy tiszta hidrogénhez való áttérés révén lakó- és közintézmények fűtése hidrogénből elívi szinten megoldható. Magyarország és az EU gáz-infrastruktúrája erre nem áll készen, de a kutatások megkezdődtek és részben felkészíthető erre a feladatra [22][23][24][42].

4.5 Kémiai szintézisek és szintetikus üzemanyagok

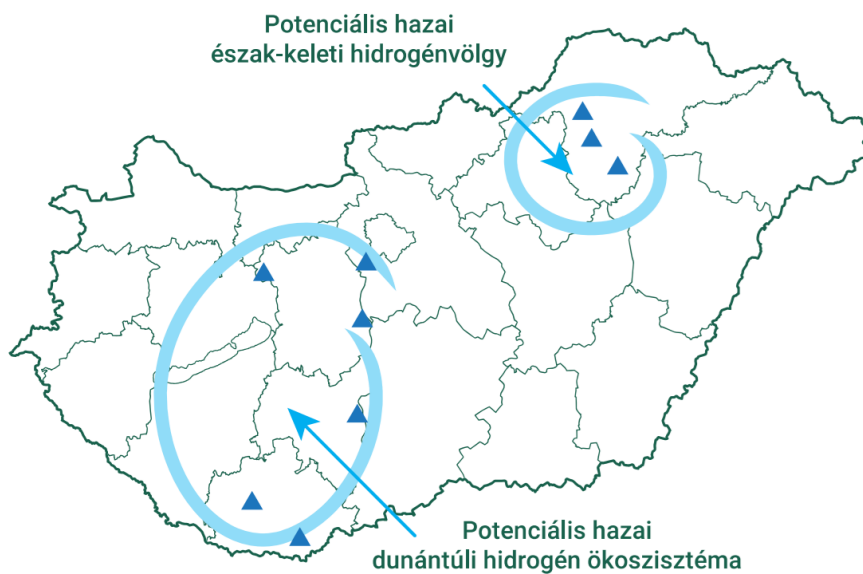
A hidrogén kombinálva szén-dioxiddal (Direct Air Capture – DAC technológia révén) szintetikus üzemanyaggá (e-fuel, e-kerosene) alakítható, amely a meglévő belső égésű motorokban és repülőgépekben használható anélkül, hogy a hardvert módosítanák [23][34][35].

9 Magyarország és a Közép-európai régió perspektívái

A Magyar Nemzeti Hidrogénstratégia [43] 2021-ben részletesen rögzíti, hogy Magyarország a közép-európai régió hidrogén-ellátási csomópontja lehet. A vidék geopolitikai helyzete, az Oroszországból érkezésre rendelkezésre álló gázvezeték-hálózat, valamint a Duna-menti, dunántúli és szegedi ipari parkok infrastruktúrája kedvezően alkalmazható a zöldhidrogén termelésének lokális csomópontjaivá való átalakításhoz [24]. A magas PV-penetráció hazai szintjén (2024-ben ~15%, majd 2030-ra >40% tervezett) a hidrogénalapú tárolási és rugalmassági kapacitások szükségessé fognak válni. A Tisza-vidéki, majd regionális solár-parkok, valamint a későbbi szélenergia-projektek természetesen kapcsolódnak az elektrolízis alapú hidrogén termeléshez, így a PV-feleslegből közvetlenül hidrogén állítható elő vagy a Dunántúli Vegyipari Koalíció, illetve az Alföldi Agrár-Ipari Zóna igényeihez igazítható a termelés.



25. ábra: Várható, hazai hidrogéelőállítás és felhasználás [24]



26. ábra: Potenciális hidrogénvölgyek Magyarországon [24]

10 Szabályozási és társadalmi kihívások

A hidrogén mint energiahordozó integrálása a jelenlegi energiagazdálkodási keretbe, 2025-ben még számos jogi és technikai akadályba ütközik. Az EU Renewable Energy Directive (RED III, 2023) és a Critical Raw Materials Regulation (CRMR) keretén belül a zöldhidrogénre vonatkozó definíciók és tanúsítási rendszerek még finomhangolásra szorulnak [25]. A meglévő gáz-infrastruktúra hidrogén-kompatibilitása szintén kérdéses – a PVC-vezetékek, szelephegesztések és fém-ridegedési problémák szisztematikus felülvizsgálatot igényelnek [42].



27. ábra: Gázhálózati kötések vizsgálata (OPUS Tigáz Zrt.) [42].

A társadalmi elfogadás szintén kihívást jelent: a hidrogén biztonságáról és kezeléséről folyó közfigyelem gyakran túlzóan pessimista (a csernobili, fukusimai események, vagy egyéb ipari balesetek). Meg kell erősíteni az oktatási és tudatosítási programokat [26][43][44]

A zöld hidrogén termelésének globális költsége (€5–9/kg, 2024-es adatok) még jelentősen magasabb a szürke hidrogénhez képest (€1.5–3/kg), az EU támogatás és a kvótaköltségek (carbon pricing) fokozatosan csökkenti ezt a differenciát.

11 Összefoglalás és jövőbeli perspektívák

A hidrogén, az energiabiztonság növelésének multidimenzionális eszköze a magas PV-penetrációjú energiarendszerek korában. **Az adaptivitás és rugalmasság biztosításán túl a hidrogén szektorszintű integrációt tesz lehetővé – egységes energiahordozóként működik a közlekedés, az ipar, a fűtés és az energiaszektor között.** Ez az integráció nem pusztán technikai fejlődést, hanem geopolitikai és gazdasági előnyöket is eredményez. Közép-Európa számára a hidrogén, egy lehetőség az energiafüggetlenség felé vezető úton.

Magyarország és a régió részben rendelkezik a szükséges infrastruktúrával, a szolár- és később szélenergia-potenciálokkal, valamint az ipari alkalmazások sokféleségével, hogy a hidrogéngazdaság reális cél lehessen.

Az EU szabályozási kerete (RED III, H2 Global, Hydrogen Bank) az előállítás és az alkalmazást támogatja. Az adaptivitás magasabb szintjének (>40% PV) elérésében a P2G-alapú hidrogén nélkülözhetetlen lesz.

A jövőbeli kutatások prioritása: (1) költségcsökkentés az elektrolízistechnológiák optimalizálása révén; (2) az infrastruktúra-kompatibilitás biztosítása; (3) a regionális hidrogén-logisztika tervezése; (4) a társadalmi elfogadás erősítése; (5) a szektorszintű integrációs modellek mélyebb tanulmányozása. Meglátásunk szerint az energiabiztonság és a hidrogéntechnológia jelentősen kapcsolódik egymáshoz az előttünk álló évtizedekben.

A 21. században az **energiabiztonság** nem a források birtoklásáról, hanem az energiarendszer **adaptivitásáról** szól.

Forrásjegyzék

- [1] International Energy Agency (IEA). (2020). World Energy Outlook 2020. Paris: IEA Publications.
- [2] IRENA. (2019). Global Energy Transformation: A roadmap to 2050. Abu Dhabi, IRENA.
- [3] Istvan, Szen ; Ervin, Racz Use of the Power Line Communication System (PLC) at Low Voltage (0.4 kV) Noisy Electrical Networks – Introducing a New Concept at Power Quality RENEWABLE ENERGY & POWER QUALITY JOURNAL RE&PQJ : RE&PQJ-10 pp. 1735-1740. Paper: 823
- [4] Szén István, Energiabiztonság és ami mögötte van, In: Kádár, Péter (szerk.) Fejezetek az elektrotechnikából II. Budapest, Magyarország : Magyar Elektrotechnikai Egyesület (MEE) (2019) pp. 153-167. , 15 p.
- [5] Szén István, Energetika és környezetvédelem (KVXEKVESLF), Budapest, Magyarország : Óbudai Egyetem
- [6] Szén István, Megújuló energiaforrások és az ellátásbiztonság paradoxona - tanulságok a spanyol villamosenergia-rendszer üzemzavarából (2025)
- [7] European Commission. (2021). Fit for 55 – EU Climate Action Programme. Brussels: EC.
- [8] SolarPower Europe. (2024). Global Market Outlook for Solar Power 2024. Brussels.
- [9] Kroposki, B., et al. (2017). Achieving a 100% Renewable Grid: Operational Requirements, Planning Principles, and Emerging Challenges. NREL Technical Report TP-6A20-67086.

- [10] Denholm, P., & Jorgenson, J. (2014). The Role of Concentrating Solar Power in High-Penetration Renewable Electricity Systems. NREL/TP-6A20-61127.
- [11] Thuram, R., & Heinrichs, H. (2021). Impact of Power-to-Gas on the electricity market in view of energy security. *Energy Policy*, 158, 112564.
- [12] Lund, H., et al. (2017). 4th Generation District Heating (4GDH): Integrating smart thermal grids into future whole energy systems. *Energy*, 68, pp. 1–11.
- [13] Buttner, T., et al. (2014). Hydrogen Supply Chains. In *Handbook of Hydrogen Storage* (pp. 367–401). Wiley-VCH.
- [14] Szén István, A hidrogén jelentősége a megújuló energiaforrások integrációjában valamint szerepe a fenntartható energetikában és a „zöld iparban”. In: Temesvári, Zsolt; Wühl, Tibor; Molnár, György (szerk.) XXXVIII. Kandó Konferencia 2022, Kiadvány kötet Budapest, Magyarország: Óbudai Egyetem, Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar (2022) 419 p. pp. 69-79. , 11 p.
- [15] Szén István, Hidrogén-energetika 1. rész, Energiatárolási célok és lehetőségek, a hidrogén értéklánc, ELEKTROTECHNIKA 116 : 9-10 pp. 28-32. , 5 p. (2023)
- [16] Schiebahn, S., et al. (2015). Power to gas: technological overview, limits and prospects. *Renewable Energy*, 85, pp. 1371–1390.
- [17] IRENA. (2022). Global Hydrogen Trade to Meet the 1.5°C Climate Goal: Part B – Technology Review of Hydrogen Trade. Abu Dhabi: IRENA.
- [18] Philibert, C. (2020). Hydrogen and a Sustainable Energy Future. Paris: IEA Publications.
- [19] Benzinger, P., et al. (2023). Review and Assessment of Hydrogen Production Technologies. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 170, p. 112975.
- [20] Staffell, I., et al. (2019). The role of hydrogen and fuel cells in the global energy system. *Energy & Environmental Science*, 12, pp. 463–491.
- [21] Vogl, V., et al. (2018). Assessment of hydrogen direct reduction for steelmaking. *Journal of Cleaner Production*, 203, pp. 736–745.
- [22] Melgar, A., et al. (2021). Implementation of hydrogen blending in gas networks. *Natural Gas Industry B*, 8(3), pp. 298–309.
- [23] Bieker, G. (2019). Synthetic Fuels and Power-to-X: Technology, Economics and Sustainability. Berlin: International Council on Clean Transportation.
- [24] Hungarian Ministry of Innovation and Technology. (2021). National Hydrogen Strategy. Budapest. <https://kormany.hu/dokumentumtar/magyarorszag-nemzeti-hidrogenstrategiaja>
- [25] European Commission. (2023). Delegated Regulation (EU) 2023/1184 on the methodology for calculating the greenhouse gas impact of hydrogen. Brussels.

- [26] Rivarolo, M., et al. (2016). Hydrogen production, storage and end-uses: current technology development status. *Journal of Energy Storage*, 18, pp. 295–306.
- [27] IEA. (2023). *Global Hydrogen Review 2023*. Paris: IEA Publications.
- [28] Istvan Szen, GH2 - Green hydrogen hydrogen energy in the light of sustainability In: Kolcun, M; Kurimsky, J; Kolcunova, I (szerk.) *PROCEEDINGS OF THE 9TH INTERNATIONAL SCIENTIFIC SYMPOSIUM ON ELECTRICAL POWER ENGINEERING (ELEKTROENERGETIKA 2017)* Kosice, Szlovákia: Technical University of Kosice.
- [29] Szén István; Dr. Janáky Csaba; Bakos Imre; Dr. Endrődi Balázs; Pintér László; Koncz Bence: A bükkábrányi naperőmű megújuló áramtermelését hasznosító innovatív energiatároló technológia fejlesztése, H2 - HIDROGÉN HÍRLEVÉL : A MAGYAR HIDROGÉN ÉS TÜZELŐANYAG-CELLA EGYESÜLET HÍRLEVELE H2 - Hidrogén hírlevél : 2021/4
- [30] Szén István, Energiabiztonság az Ipar 5.0 tükrében (Ipar 5.0 minikonferencia, Óbudai Egyetem, Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar) (2024)
- [31] Szén István, Hiedelmek vs valóság: A hidrogén csak hype vagy valós opció? (Magyar Elektrotechnika Egyesület - podcast) (2024)
- [32] Qi Chen, Zhonghong Kuang, Xiaohua Liu, Tao Zhang, Energy storage to solve the diurnal, weekly, and seasonal mismatch and achieve zero-carbon electricity consumption in buildings, *Applied Energy*, Volume 312, 2022,
- [33] Endrődi Balázs; Trapp Cintia Alexandra; Szén István; Bakos Imre; Lukovics Miklós; Janáky Csaba, Challenges and Opportunities of the Dynamic Operation of PEM Water Electrolyzers *ENERGIES* 18 : 9 Paper: 2154 , 11 p. (2025)
- [34] Balog Ádám; Kecsenovity Egon; Samu Gergely F.; He Jie; Fekete Dávid; Janáky, Csaba, Paired photoelectrochemical conversion of CO₂/H₂O and glycerol at high rate, *NATURE CATALYSIS* 7 : 5 pp. 522-535. , 14 p. (2024)
- [35] Samu Angelika Anita; Endrődi Balázs; Jones Richard; Janáky Csaba, A kísérleti paraméterek hatásainak vizsgálata a CO₂ elektrolizáló cellák hosszú távú, stabil működésének érdekében. *SCIENTIA ET SECURITAS* 5 : 2 pp. 211-217. , 7 p. (2024)
- [36] Szén István; Morva György; Haddad Richárd, Smart Metering In: BMF (szerk.) *Intelligens Energiarendszerek : a villamosenergia-ellátás új technológiai lehetőségei*, Budapest, Magyarország : Budapesti Műszaki Főiskola (BMF) (2007)
- [37] Morva György; Szén István; Zakár István, Háztartási Méretű kiserőművek elosztó hálózati csatlakozása, In: BMF (szerk.) *Fogyasztói együttműködés a fenntartható villamosenergia ellátásért : III. BMF energetikai konferencia 2008*, Budapest, Magyarország : Budapesti Műszaki Főiskola (BMF).
- [38] István Szen; Morva György, Smart metering and the Ripple Control System (2010)

- [39] Szén István, Hidrogén alapú energetika, In: Óbudai, Egyetem (szerk.) XII. Óbudai Energetikai Konferencia, Budapest, Magyarország : Óbudai Egyetem (2017) 132 p. pp. 91-102. , 12 p.
- [40] Szén István; Diószegi Mónika; Rácz Ervin, Energiabiztonság: A villamosenergia-rendszer üzembiztonságának javítása új, korszerű módszerekkel, optimális microgrid struktúra napelem, akkumulátor és hidrogén támogatással, In: Molnár, György; Wühl, Tibor (szerk.) KVK PhD Workshop Minikonferencia : Absztrakt kötet és előadás, Budapest, Magyarország : Óbudai Egyetem, Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar (2023) 23 p. pp. 18-18. , 1 p.
- [41] Jonathan Reynolds, Muhammad Waseem Ahmad, Yacine Rezgui,, Holistic modelling techniques for the operational optimisation of multi-vector energy systems, Energy and Buildings, Volume 169, 2018,
- [42] Gáti-Kiss Dániel; Bakos Imre; Szén István, Hidrogénbekeverés-projekt az OPUS TIGÁZ Zrt.-nél, H₂ - HIDROGÉN HÍRLEVÉL : A MAGYAR HIDROGÉN ÉS TŰZELŐANYAG-CELLA EGYESÜLET HÍRLEVELE 2025 : 2025/1 p. Március (2025)
- [43] Szén István; Bakosné Diószegi Mónika; Rácz Ervin, Hidrogéntechnológiák biztonsági osztályozása: a HISI-modell koncepciója és empirikus validációja BIZTONSÁGTUDOMÁNYI SZEMLE 7 : 3 pp. 113-128. , 16 p. (2025)
- [44] Szén István, Hidrogénbiztonság: Balesetek kvantitatív elemzése és biztonságközpontú, új tervezési módszerek fejlesztése. In: Molnár, György; Temesvári, Zsolt; Wühl, Tibor (szerk.) XXXIX. Kandó Konferencia 2023 Budapest, Magyarország : Óbudai Egyetem (2024) 420 p. pp. 44-49. , 6 p.

Neural Network-Based Estimation of Onshore and Offshore Wind Power Generation in Germany

František Kurimský, Marek Pavlík

Department of Electric Power Engineering, Technical University of Košice, 04200 Košice, Slovakia, frantisek.kurimsky@tuke.sk, marek.pavlik@tuke.sk

Abstract: Wind power generation has become increasingly important in Germany, where the installed capacity of wind sources currently reaches 75.75 GW. Accurate wind power generation forecasting is essential for predicting spot prices and grid management. Deep learning approaches have emerged as promising alternatives for renewable energy forecasting due to their ability to capture complex nonlinear relationships in time-series data. This study develops and compares two neural network architectures for estimating hourly wind power generation using Copernicus ERA5 reanalysis data in Germany. Models in this study are simple regression model with separate onshore/offshore branches and Convolutional Neural Network (CNN). For training, we used the wind components (u_{100} , v_{100}) from ERA5 reanalysis, representing the eastward and northward wind speeds, matched with hourly generation data and monthly data of installed capacity for wind offshore and onshore from Energy-Charts transparency platform. Training and validation data span from 2019 to 2024, testing is performed on first 5 months in 2025 to evaluate performance. Data from Copernicus are standardized, while data of installed capacity and generation are normalized. The regression model achieved validation/test Mean Square Error (MSE)/Mean Absolute Error (MAE) of 0.0765/0.0937; the CNN achieved 0.0497/0.0517, outperforming the simple model and demonstrating the effectiveness of convolutional layers for capturing spatial wind patterns. Estimation of power generation was better in onshore case than offshore case in both models. The results highlight the potential of CNNs for wind power forecasting and suggest further improvements by incorporating additional meteorological variables such as pressure, temperature, and humidity and exploring other architectures, such as CNN Long Short-Term Memory Networks.

Keywords: Electricity Market; Wind Power Forecasting; Deep Learning; Renewable Energy; Convolutional Neural Network

1 Introduction

The global demand for electricity rose by 2.2% in 2024, and renewables sources of energy shared largest growth in global energy supply [1]. The International Energy Agency (IAE) forecasts that global installed capacity of onshore wind will reach 732 GW by 2030, highlighting wind's growing strategic role [2]. Germany, a leader in European wind, aims for 115 GW onshore capacity by 2030, although current trends suggest this target may be missed [3], [4]. The integration of wind into electricity markets, particularly within the coupled European power market, has significantly affected market operations, price volatility, and cross-border power flows. It is important to study ways to predict wind generation and its effect on electricity market. Based on our previous research, studying capture rate for solar and wind energy sources, in terms of economic profitability, wind does not experience big decline in its economic capability compared to solar, in the past decade [5]. Analysis of capture rates for solar are better described in [6]. Energy market is evolving, and over past years, volatility of prices has increased drastically [7]. Based on facts mentioned above, our research is focusing on studies in energy market and its behavior, and to research better predictions for multiple factors affecting price formation. In this work, we apply neural network methods to estimate wind power output in Germany, using high-resolution meteorological data from Copernicus (ERA5) and generation and installed capacity data provided by Energy-Charts [8], [9]. By comparing a baseline regression approach with a CNN, we assess the accuracy and market relevance of advanced deep learning for wind forecasting in a highly interconnected European market.

2 Literature Overview

Wind power forecasting is a crucial area of research, given wind's growing share in electricity markets. Early approaches relied on statistical physical models, such as autoregressive, ARMA/ARIMA, and numerical weather prediction methods, each with their own limitations. Recent reviews highlight that deep learning techniques, such as Artificial Neural Networks, Convolutional Neural Networks and recurrent architectures, offer improved performance in short and multi-hour wind prediction tasks [10]. Using Web of Science's smart search, we provide quick review of recent trends, papers from 2024 and 2025, that use neural networks for wind power generation predictions.

Authors in [11] presents a novel hybrid deep learning model, combining Temporal Convolutional Network and Long Short-Term Memory with parallel architecture. They used Savitzky-Golay filter to deonise and smooth wint speed data. Experiments were conducted on real SCADA data from wind turbine in

Turkey, comparing multiple models. Hyperparameter optimization gave best results with 64 filters for TCN and LSTM layers, with filter size 3 and Tanh activation. Proposed model outperformed simpler models.

Publication [12] proposed hybrid model for ultra-short-term wind power forecasting combining LSTM networks with Vision transformers to capture temporal and spatial correlations in meteorological data. Model was tested on real-world wind farm data from the USA and data were divided into seasonal subsets. Proposed model outperformed several baseline models. The results demonstrate the capacity and capability of proposed model to learn and comprehend complex nonlinear dependencies, enhance forecasting accuracy and better adapt to climatic conditions. In future work, authors want to optimize hyperparameters and reduce model complexity.

Authors in [13] proposed wind power forecasting framework that combines deep and dense Convolutional neural networks with spatial context-aware maps of turbines. The turbine map encodes turbine locations and capacities on the spatial grid of numerical weather prediction (NWP) variables, enabling the model to learn spatial patterns effectively across multiple bidding zones. This approach helps manage distribution shifts caused by changing turbine mixes, capacity expansions, and operational factors. Evaluation was done on EEM20 dataset [14], covering Swedish bidding zones. The DenseNet-based CNN outperforms other architectures like ResNet and transformers, and conformal prediction calibration significantly improves uncertainty quantification compared to uncalibrated methods. The proposed SCDRF model efficiently produces full predictive distributions with practical value for risk-aware operation.

Publication [15] proposed a hybrid wind power forecasting system combining data decomposition, algorithm optimization and deep learning to improve accuracy. Hybrid Adaptive Decomposition Denoising algorithm was proposed to reduce noise in wind speed data, and Improved Seagull Optimization Algorithm was used to optimize LSTM model parameters. Augmentation of data was also used, to better quantify uncertainties.

Wind power forecasting is a vital research area due to wind energy's increasing role in electricity markets, with early methods like statistical and physical models having notable limitations. Recent deep learning techniques have shown improved forecasting accuracy over short and medium time horizons. Recent studies present hybrid deep learning models combining Temporal Convolutional Networks and LSTM, or Vision Transformers with LSTM, demonstrating enhanced accuracy on real turbine data by capturing complex temporal and spatial patterns. Additionally, spatially aware CNN-based frameworks using turbine maps address distribution changes in regional forecasting while improving uncertainty quantification. These advances underscore the growing efficacy of hybrid and spatially informed deep learning approaches in wind power prediction.

3 Data Processing and Model Training

In this study, we acquired onshore and offshore wind generation data for Germany via the Energy-Charts API and extracted ERA5 Copernicus meteorological data over Germany, specifically u_{100} and v_{100} wind speed components. Data processing was conducted using pandas and xarray Python libraries. Both wind speed and wind power generation data are structured at hourly resolution, while installed capacity is recorded monthly. The ERA5 dataset provides wind data on 5 x 5 km spatial grid, where each grid cell contains 2 value, the east–west (u_{100}) and north–south (v_{100}) wind speed components. For illustrative purposes, in Figure 1 we present picture of wind speed map over Europe, where wind speed at each grid point is computed using formula $wind\ speed = \sqrt{(u_{100} * v_{100})}$.

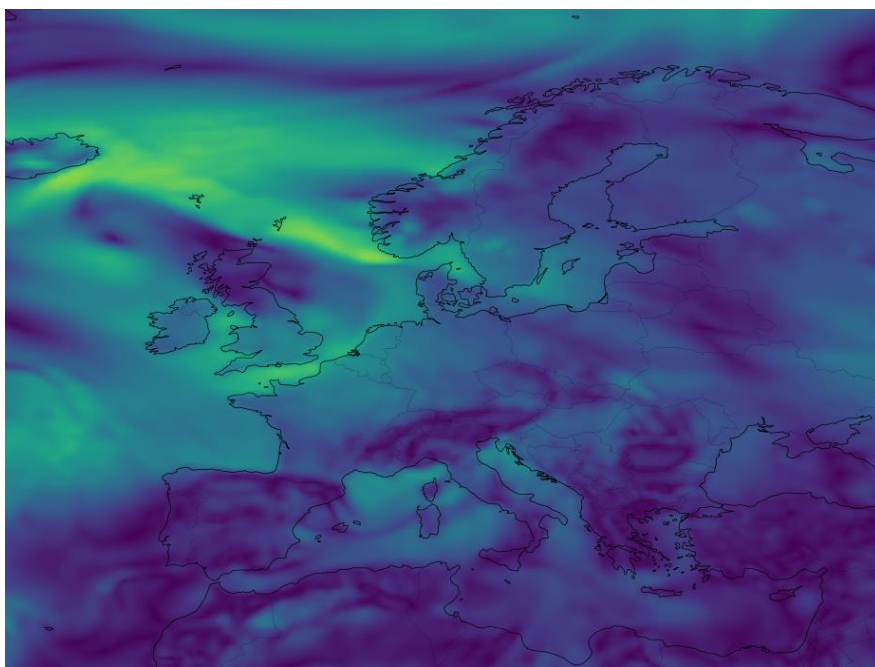


Figure 1

Wind speed above Europe, time 2024-01-01 00:00

Following data acquisition, we standardized wind speed components data using z-score normalization. Conversely, wind power generation and installed capacity values were normalized using min-max scaling with buffers to prevent boundary effects. Specifically, for generation values (both onshore and offshore) we used 10% buffer, and for installed capacities (both onshore and offshore) we used 20% buffer relative to their respective data ranges.

Our dataset comprises six years of hourly wind meteorological and generation data (2019-2024) and data from January till May for year 2025. To establish robust model validation we partitioned dataset for training, validation and testing. The 2019-2024 period was divided into training (80%) and validation (20%) subsets, with shuffle implemented from scikit-learn Python library. Testing period represents first five months of 2025, ensuring evaluation on distinct data from the training horizon. This approach enables us to create models for estimation of wind power generation from one sample, instead of multi-hour samples.

To estimate hourly wind power generation for onshore and offshore wind farms in Germany, we compared two neural network architectures, a simple fully-connected regression model and a Convolutional Neural Network (CNN). For model development we used Tensorflow Python framework. Both models process wind field data and installed capacity as inputs, with separate prediction branches for onshore and offshore generation.

The simple regression model takes as input wind data arranged on a grid and capacity values for offshore and onshore wind farms separately. The wind data is first flattened into a single vector, removing spatial structure. This flattened input passes through two fully connected layers with Rectified Linear Unit (ReLU) activation to learn key features. Then the model splits into two branches, one for offshore and one for onshore prediction. Each branch concatenates its capacity input to the features before producing its final output through a sigmoid-activated dense layer. The sigmoid activation restricts predictions between 0 and 1, matching the normalized scale of target power values. Outputs from both branches are combined into a final two-dimensional prediction vector, representing onshore and offshore generation simultaneously. In Figure 2 we present architecture of simple regression model.

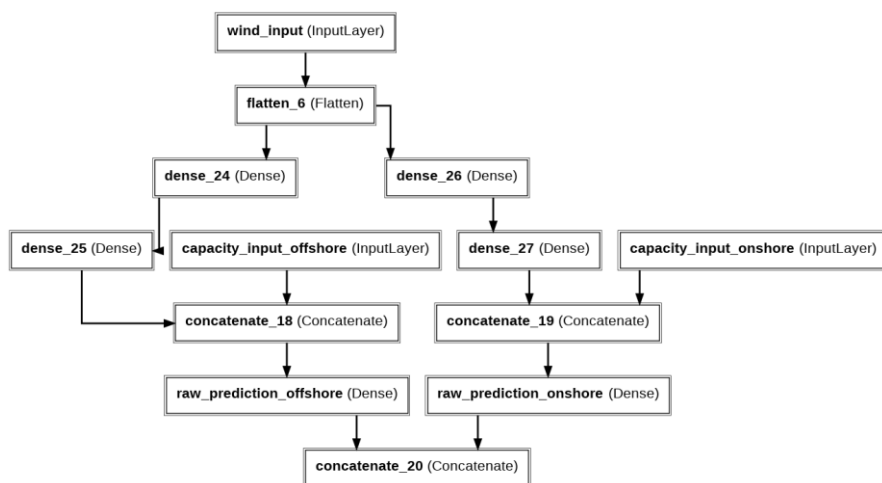


Figure 2
Architecture of simple regression model

The CNN model is designed to capture spatial wind patterns from ERA5 grid data and produce separate power generation estimates for offshore and onshore wind. It takes wind data arranged on a grid and installed capacities for both wind types. The input wind data is first processed through three convolutional layers, each increasing the number of filters (32, 64, 128), with ReLU activations and max pooling for dimensionality reduction. The extracted features are then flattened and split into two branches, one for offshore, the other for onshore predictions. Each branch has two dense layers with ReLU activations, concatenated with its respective installed capacity input for contextual scaling. The outputs are passed through sigmoid activation to ensure results stay within the normalized range of power values before being merged into a final two-element output. In Figure 2 we present structure of both models. In Figure 3 we present architecture of prepared CNN model.



Figure 3
Architecture of CNN model

Both models were trained using the Adam optimizer with mean squared error (MSE) as the loss function and mean absolute error (MAE) as the evaluation metric. Training was conducted for a maximum of 10 epochs with early stopping based on validation loss to prevent overfitting. Batch size was set to 32, and models were trained on GPU hardware to accelerate computation. Custom Keras Sequence generators were implemented to efficiently load wind field data, capacity inputs, and target power values during training, handling the multi-dimensional spatial structure and temporal alignment of hourly data.

4 Results

As we mentioned above, both models were evaluated on data from January to May of 2025. The CNN model demonstrated performance improvements over the baseline regression approach. Specifically, the CNN model achieved a validation MAE of 0.0497 compared to the regression model's 0.0765, and on the test set, the CNN attained 0.0517 MSE versus 0.0937 for regression model. The CNN model showed superior capability in capturing spatial wind patterns from ERA5 meteorological data, particularly for onshore predictions. Onshore generation forecasting proved more accurate for both models, suggesting that the spatial patterns encoded in the 100-meter wind speed components better represent onshore wind resource variability. In contrast, offshore wind predictions exhibited larger errors, which may be caused by smaller spatial grid area representing offshore wind speeds. Additional meteorological variables (pressure, temperature, humidity) beyond wind speed components or hybrid architectures combining CNNs with temporal models like LSTMs can improve generation estimates.

In Figure 4 and Figure 5 we showcase actual and estimated values for onshore and offshore wind generation from our simple regression model. Offshore wind predictions show substantial variability and consistently underestimate peak generation, indicating the model struggles with extreme weather conditions typical of maximum resource availability. Onshore wind predictions display better performance, tracking observed values more closely throughout the test period. The simple regression model proves insufficient for capturing the spatial complexity of wind fields.

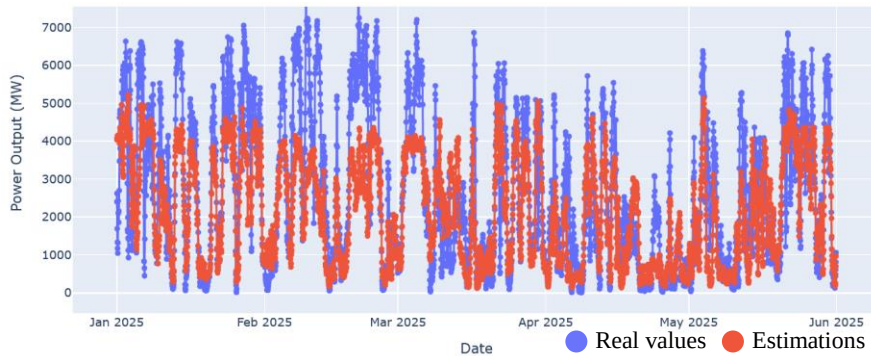


Figure 4

Real and Estimated values for **offshore** wind generation from **simple regression model**

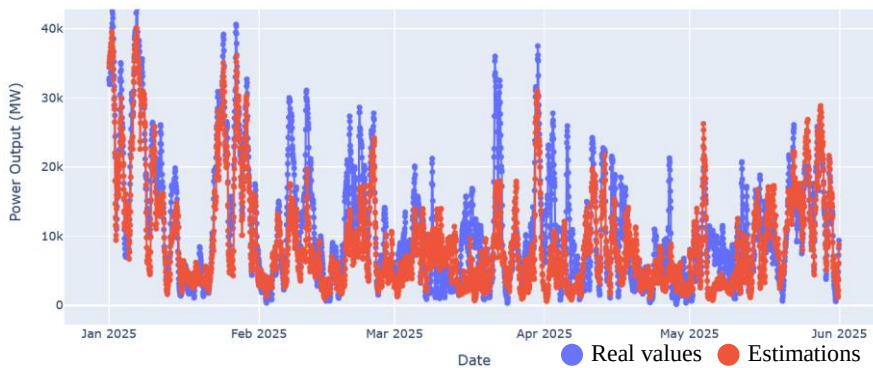


Figure 5

Real and Estimated values for **onshore** wind generation from **simple regression model**

In Figure 6 and Figure 7 we present actual and estimated values over testing period for CNN model. The CNN model substantially outperforms the simple regression model, with estimated values tracking observed generation significantly more closely. Onshore estimates show better agreement with observations, with the model effectively following rapid generation ramps. In case of offshore generation, model did not performed as good as in case of onshore estimates, which may be caused by smaller spatial grid area representing offshore wind speed components. These results confirm that the convolutional architecture's spatial feature learning enables substantially improved wind power forecasting compared to dense fully-connected networks.

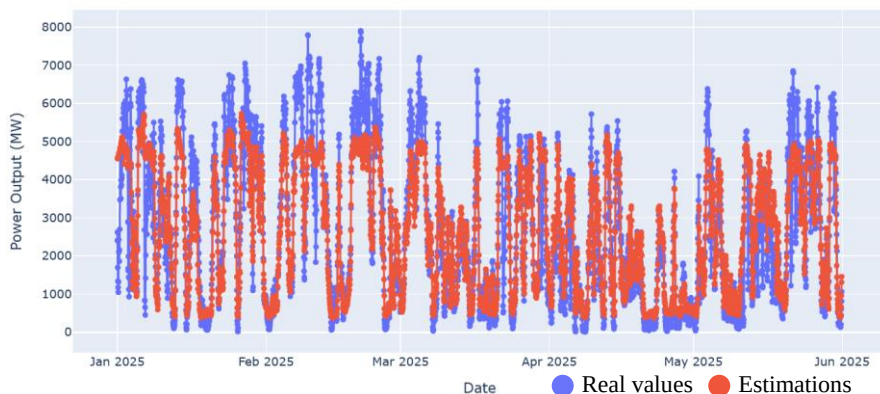


Figure 6

Real and Estimated values for **offshore** wind generation from **CNN model**

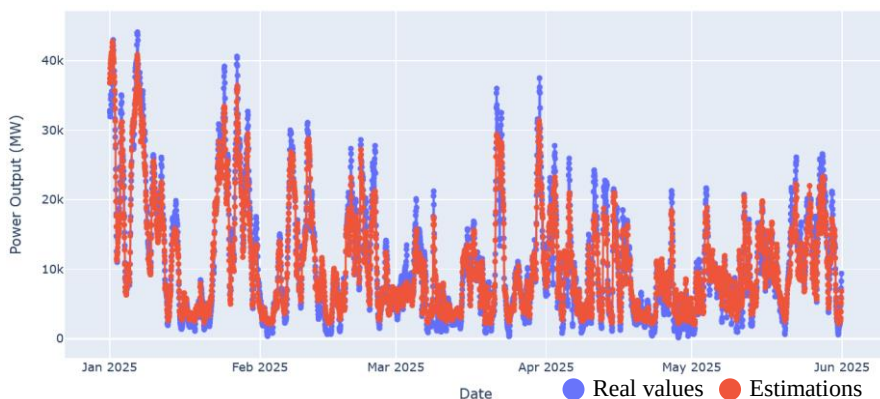


Figure 7

Real and Estimated values for **onshore** wind generation from **CNN model**

Conclusions

This study successfully demonstrated the application of deep learning techniques on wind power generation estimation in Germany using ERA5 meteorological reanalysis data with installed capacity data. Comparison of simple regression model and CNN model proved, that CNN model can better comprehend spatial data for wind power generation estimation. In case of onshore wind, estimated values better followed real world values than in case of offshore wind, which is caused by small spatial grid area representing offshore wind speeds, suggesting new approach, where new meteorological data should be added to dataset, such as humidity, temperature and atmospheric pressure.

European market price formation mechanism are directly influenced by the trend of renewable energy sources. Accurate wind power forecasting directly influences

balancing operations, reserve deployment, and price formation and is crucial for grid operators and market participants.

Future work should explore several promising directions to further improve accuracy. Incorporating additional meteorological variables may enhance offshore wind modeling by capturing more complete data. Hybrid architectures combining CNNs for spatial feature extraction with LSTM could better capture multi-scale wind variability.

Acknowledgement

Funded by the EU NextGenerationEU through the Recovery and Resilience Plan for Slovakia under the project No. 09I03-03-V05-00015.

References

- [1] “Global Energy Review 2025 – Analysis,” IEA. Accessed: Oct. 23, 2025. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2025>
- [2] “Renewables 2025 - Analysis and forecasts to 2030,” IEA. Accessed: Oct. 23, 2025. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/renewables-2025>
- [3] “EEG 2023 - nichtamtliches Inhaltsverzeichnis.” Accessed: Oct. 23, 2025. [Online]. Available: https://www.gesetze-im-internet.de/eeg_2014/
- [4] “BIPR.” Accessed: Oct. 23, 2025. [Online]. Available: <https://bipr.jhu.edu/BlogArticles/19-Germany-Will-Not-Meet-Its-2030-Renewable-Energy-Build-Out-Targets.cfm>
- [5] F. Kurimský, “Electricity price prediction: Overview, data analysis and future research,” presented at the 25th Scientific Conference of Young Researchers, Košice, Slovakia: Technická univerzita v Košiciach, 2025, pp. 159–162. [Online]. Available: <https://scyr.fei.tuke.sk/index.php/proceedings/>
- [6] M. Pavlík, M. Bereš, and F. Kurimský, “Analyzing the Impact of Volatile Electricity Prices on Solar Energy Capture Rates in Central Europe: A Comparative Study,” *Applied Sciences*, vol. 14, no. 15, Art. no. 15, Jan. 2024, doi: 10.3390/app14156396.
- [7] M. Pavlík, F. Kurimský, and K. Ševc, “Renewable Energy and Price Stability: An Analysis of Volatility and Market Shifts in the European Electricity Sector (2015–2025),” *Applied Sciences*, vol. 15, no. 12, p. 6397, Jan. 2025, doi: 10.3390/app15126397.
- [8] “ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present.” Accessed: Oct. 10, 2025. [Online]. Available: <https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/reanalysis-era5-single-levels?tab=download>
- [9] P. D. B. Burger, “Energy-Charts.” Accessed: Sept. 27, 2024. [Online]. Available: <https://www.energy-charts.info/index.html>

- [10] E. Arslan Tuncar, Ş. Sağlam, and B. Oral, “A review of short-term wind power generation forecasting methods in recent technological trends,” *Energy Reports*, vol. 12, pp. 197–209, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.egy.2024.06.006.
- [11] S. Liu, T. Xu, X. Du, Y. Zhang, and J. Wu, “A hybrid deep learning model based on parallel architecture TCN-LSTM with Savitzky-Golay filter for wind power prediction,” *Energy Conversion and Management*, vol. 302, p. 118122, Feb. 2024, doi: 10.1016/j.enconman.2024.118122.
- [12] L. Xiang, X. Fu, Q. Yao, G. Zhu, and A. Hu, “A novel model for ultra-short term wind power prediction based on Vision Transformer,” *Energy*, vol. 294, p. 130854, May 2024, doi: 10.1016/j.energy.2024.130854.
- [13] J. Jonkers, D. N. Avendano, G. Van Wallendael, and S. Van Hoecke, “A novel day-ahead regional and probabilistic wind power forecasting framework using deep CNNs and conformalized regression forests,” *Applied Energy*, vol. 361, p. 122900, May 2024, doi: 10.1016/j.apenergy.2024.122900.
- [14] “Data and Code for the EEM2020 Wind Power Forecasting Competition,” University of Strathclyde. Accessed: Nov. 11, 2025. [Online]. Available: <https://pureportal.strath.ac.uk/en/datasets/data-and-code-for-the-eem2020-wind-power-forecasting-competition/>
- [15] Y. Zhang, X. Kong, J. Wang, H. Wang, and X. Cheng, “Wind power forecasting system with data enhancement and algorithm improvement,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 196, p. 114349, May 2024, doi: 10.1016/j.rser.2024.114349.

Háromfázisú aszinkron motorok mechanikai eredetű életciklus-modelljének elemzése

Bendiák István, Semperger Sándor

Óbudai Egyetem, Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar, Automatizálási és Energiarendszerek Intézet, Automatika Tanszék, 1034 Budapest Bécsi út 96/B, bendiak.istvan@uni-obuda.hu, semperger.sandor@kvk.uni-obuda.hu

A tanulmány célja a háromfázisú aszinkron motorok mechanikai eredetű életciklus-modelljének elemzése, különös tekintettel a tengelykapcsolat hatásaira. Az aszinkron motorok üzeme során fellépő rezgések, nyomatékingadozások és tengelyirányú erők jelentős mértékben befolyásolják a kapcsolódó gépelemek élettartamát. A kutatás középpontjában a motor és a hajtott gép közötti tengelykapcsolat dinamikai viselkedése áll, amely kulcsfontosságú a rendszer mechanikai stabilitása és az energiaátvitel hatásfoka szempontjából. A vizsgálat során különböző tengelykapcsoló típusok – rugalmas, merev és csillapított – modellezése és összehasonlítása történt analitikus módszerekkel. A mért rezgés- és nyomatékadatok alapján meghatározásra került a kopási és fáradási jelenségek időbeli lefolyása, amelyek a motor teljes életciklusát jellemzik. A modell célja, hogy előre jelezze a tengelykapcsolat degradációját, és ezáltal lehetőséget adjon a karbantartási intervallumok optimalizálására. A kapott eredmények hozzájárulnak a villamos hajtások megbízhatóságának növeléséhez, valamint a gépegységek hosszú távú diagnosztikai fejlesztéséhez.

Kulcsszavak: Aszinkron motor, tengelykapcsolat, diagnosztika, kopás, életciklus-modell

1. Rezgésdiagnosztika szerepe aszinkron gépek állapotfigyelésében

A háromfázisú aszinkron gépek megbízható és hatékony üzemeltetése szempontjából kiemelt jelentőséggel bír a rezgésdiagnosztika [1], különösen annak irány-specifikus vizsgálata [2]. A rezgésvektor három fő irányban radiális, tangenciális és axiális történő elemzése lehetőséget nyújt különféle géphibák korai felismerésére és kategorizálására [3]. Kutatási célból e három rezgésirány részletes vizsgálata elengedhetetlen a forgógépek dinamikai viselkedésének teljes körű megértéséhez [4].

A radiális irányú rezgésösszetevő a leggyakoribb indikátor a forgóelemek ki-egyensúlyozatlansági, a rotor excentricitásának és a gördülőcsapágyak lokalizált

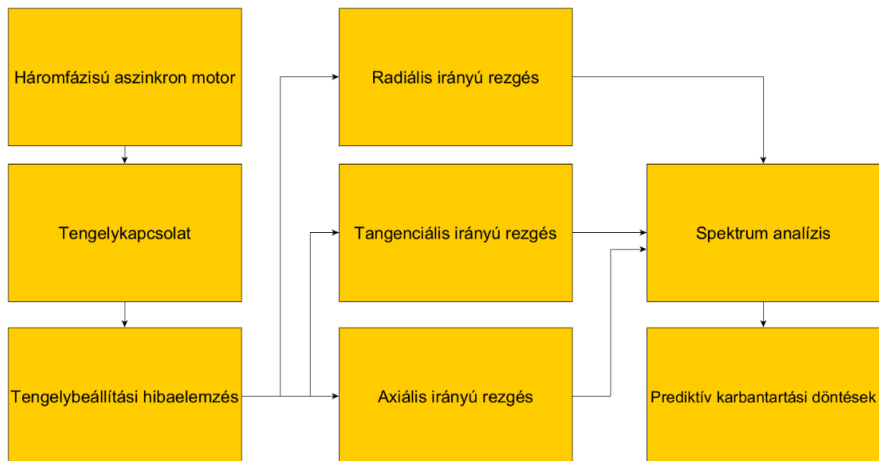
hibái-nak (pl. belső gyűrű, külső gyűrű, görgő) detektálására. A spektrumanalízisben ezek a hibák tipikusan jellemző csapágyfrekvenciák és azok harmonikusai formájában jelennek meg, amely lehetőséget teremt prediktív karbantartási stratégiák alkalmazására [5].

A tangenciális irányú rezgésadatok is lényeges szempontot képviselnek a gyakorlatban, kutatási szempontból fontos kiegészítő információt szolgáltatnak a rotor-stator (forgórész-állórész) kölcsönhatások, nem szimmetrikus légréeloszlás és mágneses aszimmetriák vizsgálatához [6]. Az ezen irányú rezgésnövekedés olyan nemlineáris dinami-kai jelenségekre utalhat, mint például a forgórész hibája vagy az örvényáramok által keltett lokális melegedési pontok. Az axiális irányú rezgésösszetevő elsődlegesen a gépek szerkezeti illesztéseinek és tengelykapcsolatainak vizsgálatakor válik jelentőssé [7]. Az itt mért rendellenességek utalhatnak tengelybeállítási hibákra, hő okozta tengely túlzott melegedésére, illetve csapágykopásra vagy túlterhelésre [8]. Továbbá az axiális rezgés fokozódása gyakran összefüggésbe hozható mechanikai meglazulással vagy szerkezeti pontos rögzítéshiányával [9].

A három irány mentén végzett komplex rezgésdiagnosztikai vizsgálatok tehát nemcsak a hibák korai felismerésében játszanak kulcsszerepet [10], hanem hozzájárulnak a forgógépek modellalapú dinamikai leírásához és a megbízhatósági elméletek pontosításához is [11]. A kutatás jövőbeli irányai közé tartozik a többirányú rezgésadatok mesterséges intelligencián alapuló elemzése, illetve ezek integrálása automatizált [12] döntéstámogató karbantartási rendszerekbe [13]. A blokkvázlat a háromfázisú aszinkron motorok tengelybeállítási hibáinak rezgésdiagnosztikai hatásait mutatja be [13]. A rendszer első kérdése a tengelykapcsolat típusa, ahol a tengelybeállítási hibák kialakulhatnak [14].

A rendszer kiindulópontja a [15] forgógép és a hozzákapcsolt körös tengelykapcsoló, ahol a nem megfelelő tengelybeállítás rejtett hibaforrásként van jelen. A tengelyeltérések különféle mechanikai igénybevételeket generálnak, melyek három fő rezgésirányban jelentkezhetnek: radiális (ütések, kiegyensúlyozatlanság), tangenciális (forgórész instabilitás), valamint axiális (tengelyirányú elmozdulás, lazaság) [16]. A hibából származó rezgésjelek rögzítése után spektrális elemzés történik, amely a jelfeldolgozás egyik kulcsfontosságú lépése. Az így feltárt jellemzők például hibafrekvenciák vagy harmo-nikus torzulások lehetővé teszik a hiba pontosabb azonosítását. A spektrum alapján levont következtetések alapot szolgáltatnak prediktív karbantartási döntésekhez, amelyek célja a gépek élettartamának meghosszabbítása, az állásidő csökkentése és az üzembiztonság növelése. A blokkvázlat (1. ábra) logikai sorrendben mutatja be az összefüggést a fizikai meghibásodás, az érzékelhető rezgésviselkedés és a döntéstámogatás között, elősegítve ezzel a gépdiagnosztikai modellek rendszerszintű értelmezését [17].

Ebben a pályamunkában a radiális irányú rezgésmérés feldolgozását mutatom be. A több irányú mérések (axiális, tangenciális) ugyanebben a folyamatban részesültek és elemzési mentek át a gép állapotának felmérésére.



1. ábra Blokkvázlat a háromfázisú aszinkron motorok tengelybeállítási hibáinak rezgésdiagnosztikai lehetőségeit mutatja be.

2. Mérés matematikai készlete, felírása, valamint szerepe a gépmoell kialakításban

Korábbi publikációban [7] foglalkoztam a géprendszerek mechanikai leírásával. Ebben az esetben is lényeges szempont kiemelni, hogy a matematikai felhasználása nélkülözhetetlen. A gépek üzemét külső vagy belső okokra visszavezethető lökések, dinamikus hatások jellemzik, melyeket csökkenteni, mérsékelni szükséges, különösen indítás és terhelésváltozás esetén.

A dinamikus hatásokat csökkentve védjük a gépet hajtó háromfázisú aszinkron motorokat. Fordított a feladat, amikor egy belsőégésű motor járásából adódó dinamikus hatásokat tompítják a hajtott egység védelme, kedvezőbb üzemre szempontjából (hibrid-hajtású járművek). Leggyakrabban a hajtott gép feladatából, a technológiából adódik a jelentős dinamikus hatás és ennek csökkentése a feladat. A lökésszerű terhelésingadozókat rugalmas kapcsolók vagy rugalmas hajtások alkalmazásával lehet csillapítani. A villamos hajtások esetén a frekvenciaváltók korszaka előtt gyakori volt, hogy a hálózati frekvenciaingadozása miatt lendkereket alkalmaztak, ez inkább szinkron gépekre volt érvényes, de minden forgó mozgást végző rendszerben hasznos. A matematikai háttér elkészítéséhez [1,4,5] megjelölt szakirodalmakat használtam.

Ha röviden össze akarjuk foglalni egy lengő rendszer fogalmát, akkor követke-zők szerint járunk el: A valóságos rugót két tényező, a rugómerevség és a csillapítási tényező jellemez. Legyen a rugómerevség s , a csillapítási tényező δ . A rugómerevség a kitérő erő, illetve nyomaték és kitérés, illetve szögelfordulás hányadosaként lehet defini-álni. A rugómerevség lehet állandó (lineáris rugóknál) és a terhelés függvényében válto-zó (regresszív illetve progresszív rugók esetén). A számítások egyszerűsítése érdekében a nem lineáris karakterisztikájú rugóknál a közepes rugómerevséggel kell számolni [4].

A csillapítási tényező [5]:

$$\delta = \frac{F}{\dot{f}} = \frac{M}{\dot{\varphi}} = \operatorname{tg} \beta \quad (1)$$

Az F kitérő erővel vagy M nyomatékkal egyenesen, az f kitérés, illetve a φ szögelfordulás sebességével pedig fordítva arányos. A gyakorlati számításokban a csillapítási tényezőt állandónak lehet tekinteni (bizonyos esetekben).

A valóságos rugó párhuzamosan kapcsolt s rugómerevségű ideális rugóval és δ csillapítási tényezőjű viszkózus elemmel helyettesíthető. Így a rugalmasan összekapcsolt erő és munkagép, amely egy kéttömegű lengőrendszert alkot [4].

A mozgás differenciálegyenletei:

$$\theta_1 \frac{d^2 \varphi_1}{dt^2} + \delta \frac{d\varphi}{dt} + s\varphi = M(t) \quad (2)$$

És:

$$\theta_2 \frac{d^2 \varphi_2}{dt^2} - \frac{d\varphi}{dt} - s\varphi = 0 \quad (3)$$

Ahol φ_1 a hajtóoldal, a φ_2 a hajtott oldal, $\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$, a tengelykapcsoló szögelfordulása. Az első egyenlettel θ_1 -gyel a másodikat θ_2 -vel osztva, majd összevonva:

$$\frac{d^2 \varphi}{dt^2} + \left(\frac{\varphi}{\theta_1} + \frac{\varphi}{\theta_2} \right) \frac{d\varphi}{dt} + \left(\frac{s}{\theta_1} + \frac{s}{\theta_2} \right) \varphi = \frac{M(t)}{\theta_1} \quad (3)$$

Lineáris inhomogén differenciálegyenletet kapunk:

Legyen bevezetve [4]:

$$\frac{1}{2} \left(\frac{\varphi}{\theta_1} + \frac{\varphi}{\theta_2} \right) = K \quad (4)$$

$$\frac{s}{\theta_1} + \frac{s}{\theta_2} = \omega_0^2 \quad (5)$$

$$\frac{M}{\theta_1} = m_0 \quad (6)$$

A gerjesztő nyomaték legyen [4]:

$$M(t) = M_0 \cdot \cos \omega t \quad (7)$$

Ezeket behelyettesítve:

$$\ddot{\varphi} + 2K\dot{\varphi} + \omega_0^2 \cdot \varphi = m_0 \cdot \cos \omega t \quad (8)$$

A differenciálegyenlet általános megoldását úgy érhetjük el, hogy a homogén egyenlet általános megoldásához hozzáadjuk az inhomogén egyenlet partikuláris megoldását. A számítás egyszerűsítése érdekében a jobb oldalt $m_0 \cdot \sin \omega t$ hozzáadásával $m_0 e^{i\omega t}$ -tel egészítjük ki, és ennek megfelelően φ -t komplex számnak tekintjük. A megoldásban természetesen φ -nek csak a valós részét vesszük figyelembe, így:

$$\ddot{\varphi} + 2K\dot{\varphi} + \omega_0^2 \cdot \varphi = m_0 \cdot e^{i\omega t} \quad (9)$$

Az egyenlet megoldását:

$$\varphi = A \cdot e^{i(\omega t - \gamma)} \quad (10)$$

Alakban lehet keresni [4]:

A kifejezés deriválásával és helyettesítésével az:

$$A \cdot (-\omega^2 + 2 \cdot K \cdot i \cdot \omega + \omega_0^2) \cdot e^{i(\omega t - \gamma)} = m_0 \cdot e^{i\omega t} \quad (11)$$

Összefüggést lehet nyerni: Ezt átrendezve és a jobboldalt kifejtve:

$$A \cdot (\omega_0^2 - \omega^2 + 2 \cdot K \cdot i \cdot \omega) = m_0 \cdot e^{i\gamma} = m_0 \cdot (\cos \gamma + i \cdot \sin \gamma) \quad (12)$$

A két komplex szám abszolút értékének egyenlőségéből:

$$m_0 = A \cdot \sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4 \cdot K^2 \cdot \omega^2} \quad (13)$$

Az iránytangensek egyenlőségéből pedig a fáziskésés tangense:

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{2 \cdot K \cdot \omega}{\omega_0^2 - \omega^2} \quad (14)$$

Az alapegyenlet partikuláris megoldásának valós része:

$$\varphi = A \cdot \cos(\omega t - \gamma) \quad (15)$$

A homogén egyenlet általános megoldás [4]:

$$\varphi = a \cdot e^{-Kt} \cdot \sin(\sqrt{\omega_0^2 - K^2} \cdot t + \alpha) \quad (16)$$

Az a és α állandók a kezdeti feltételekből határozhatók meg. Az inhomogén egyenlet általános megoldása [4]:

$$\varphi = \frac{m_0}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4K^2 \cdot \omega^2}} \cdot \cos\left(\omega t - \arctg \frac{2 \cdot K \cdot \omega}{\omega_0^2 - \omega^2}\right) + a \cdot e^{-Kt} \cdot \sin(\sqrt{\omega^2 - K^2} \cdot t + \alpha) \quad (17)$$

A rugalmas tengelykapcsoló lengése egy ω körfrekvenciájú csillapítatlan és egy:

$$\sqrt{\omega^2 - K^2} \quad (18)$$

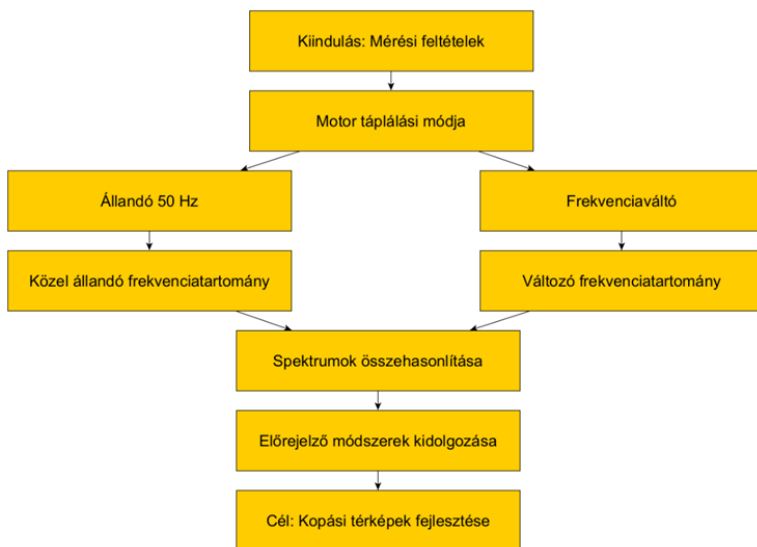
Körfrekvenciájú csillapított rezgésből tevődik össze. Ha $\omega \leq K$, akkor a csillapított rezgés aperiodikus és bizonyos idő múlva elhanyagolható, de az indítást követő rövid időtartam alatt lényegesen befolyásolja a tengelykapcsoló lengéseit. A korábbi összefüggések alapján belátható, hogy a csillapítás intenzitása a választott rugó paramétereitől (s és δ) függ, valamint a kapcsoló tehetetlenségi nyomatékától is [4,5].

A csillapítás megszűnése [4] után az egyenlet jobb oldalának első tagja írja le a mozgást, amely a gerjesztő nyomaték (M) körfrekvenciájának (ω) megfelelő csillapítatlan kényszerrezgés. Ennek a rezgésnek amplitúdója (A) és fáziskésése

(γ) a gerjesztő nyomaték frekvenciájától és a rugó paramétereitől függ. Az amplitúdó az $\omega = \omega_0$ -ig növekszik, majd csökken, vagyis maximumát akkor éri el, amikor a gerjesztő frekvencia ω az ω_0 saját frekvencia közelébe esik. Ekkor amennyiben a rendszer csillapítóképességét jellemző K érték kicsi, bekövetkezhet a rezonancia jelensége. Ezen ismeretekkel összefüggésben indult a gépcsoport vizsgálata.

3. Háromfázisú aszinkron motor gépállapotfigyelő rendszere, rezgésmérések bemutatása

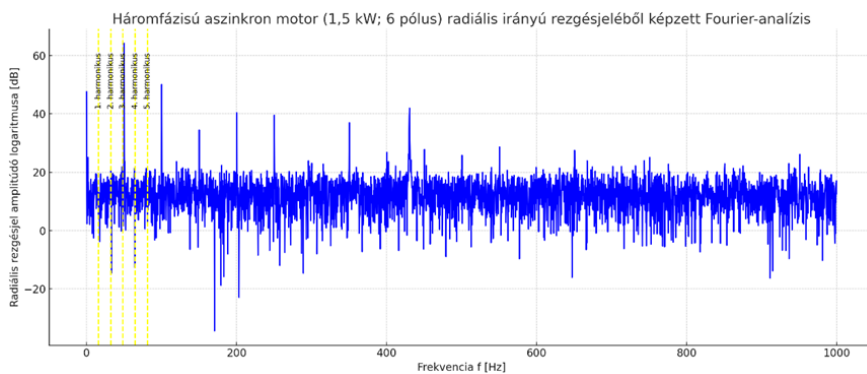
A következő fejezet részben a rezgésmérés folyamatát mutatom be. A nemzetközi szakirodalmak áttekintése után arra a következtetésre jutottam, hogy a 2. ábrán látható vizsgálati lépéseket állítsam fel. A vázlat külön választja villamos gépet tápláló hálózat típusát, a jelanalízis szempontjából kiemelt szempont.



2. ábra Mérési feltételek alapvető elképzelése és a kutatási cél kialakítása.

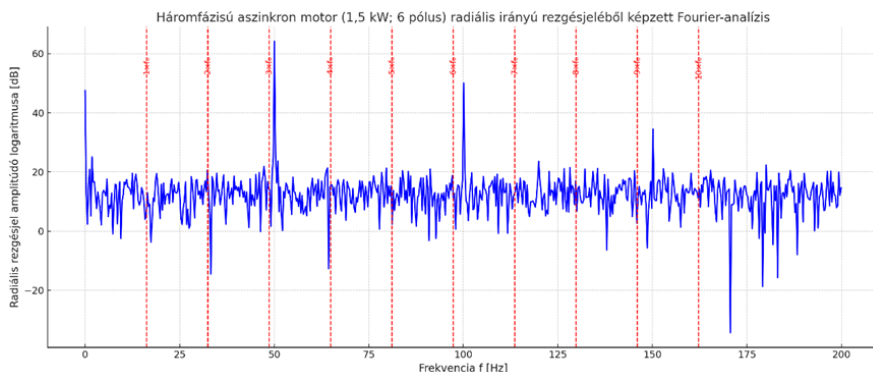
3.1. Radiális irányú rezgésjel elemzése

A 3. ábrán a hibafrekvenciák alsó tartománya látható (1000 Hz alatti értékek) tehát itt már újszerű előrejelzés nem adható, mert már a hibafrekvenciák tartományában vagyunk. Az elemzést ki kell terjeszteni nagyobb frekvencia és amplitúdó eloszlási tartományokra.



3. ábra Radiális irányú rezgésjel Fourier-analízise, tengelytűési frekvenciák keresése a spektrumban (FFT-Fast Fourier Transform).

A 4. ábra a tengelyütési frekvenciák harmonikusait mutatja 1-10. rendszámig, jelölése a piros szaggatott vonal. A számítási ciklus, amely gépelemzésben, azért felelős, hogy folyamatosan átszámolja a hibajelek nagyobb frekvenciákra vonatkozó tartományait, azt vizsgálja, mikor esik egybe egy amplitúdó komponens a rávonatkozó frekvenciaértékkel.



4. ábra Radiális irányú rezgésjel Fourier-analízise, tengelyütési frekvenciák keresése a spektrumban (FFT-Fast Fourier Transform).

Összefoglalás

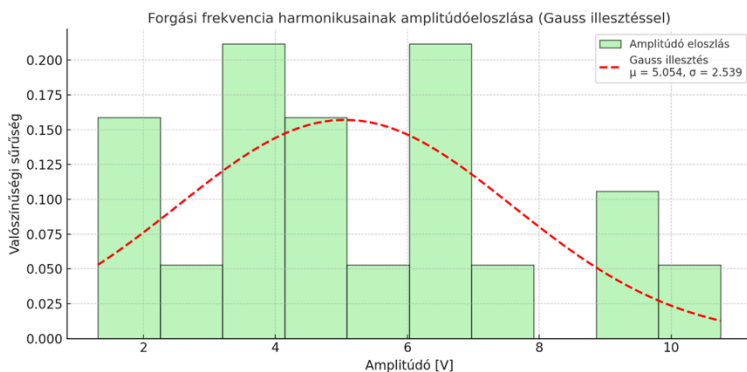
Az eloszlásfüggvények kulcsszerepet játszanak a hibajelek elemzésében, mert statisztikai képet adnak [11,12,13,14,] a jel viselkedéséről. [3] Az eloszlások segítenek megérteni, hogy milyen valószínűséggel fordulnak elő bizonyos értékek. Ez különösen fontos zaj, rezgés vagy más hibajelenségek vizsgálatánál. Az eltérések szórása és eloszlása gyakran utal valamilyen rejtett hibára vagy szisztematikus problémára. A normáeloszlás (Gauss-görbe) például sok fizikai rendszerben az alapzajt modellezi. Ha a hibajel jelentősen eltér ettől, az anomáliára utalhat [3].

A Poisson-eloszlás diszkrét események, például hibajelek kiemelkedése, csúcspontok előfordulását modellezheti. Az eloszlásfüggvény alapján megjósolható, milyen gyakran várhatók szélső értékek, ami segíti a karbantartási tervezést. A különböző eloszlások összehasonlításával eldönthető, hogy a jel véletlenszerű vagy ismétlődő hibákat tartalmaz. Az illesztés pontossága jelezheti, hogy a mért jel mennyire viselkedik optimálisan.

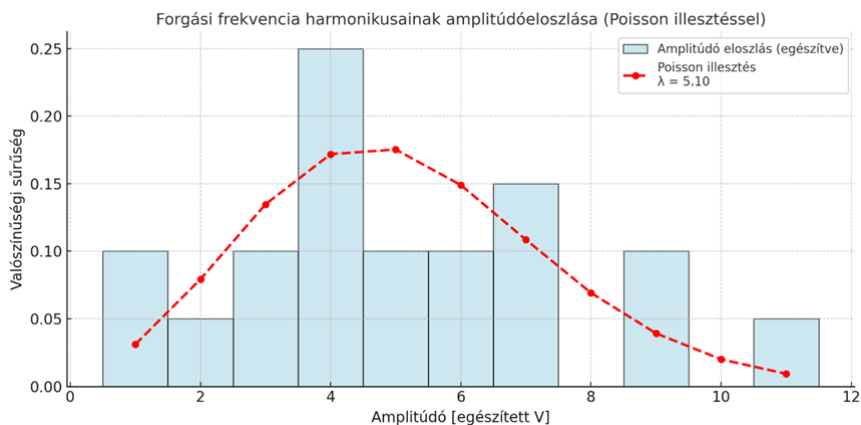
A hibafrekvenciákhoz tartozó amplitúdóeloszlások vizsgálatával kiszűrhetők a domináns hibaforrások. Az eloszlás görbéje és annak paraméterei (pl. várható érték, szórás) segítenek az automatizált hibafelismerésben. A szélsőséges értékek gyakoriságát is az eloszlás mutatja meg, ami gépvédelmi szempontból kritikus lehet. A hibajelek idő-beli viselkedésének elemzéséhez is elengedhetetlen az eloszlási tulajdonságok ismerete [1, 3].

Ezek alapján meghatározhatók riasztási szintek és prediktív karbantartási szabályok. A statisztikai modellekbe (pl. gépi tanulás) az eloszlásjellemzők beépíthetők, mint bemeneti paraméterek. A rezgésdiagnosztikában a frekvenciatartományi eloszlások megmutatják a gépelemek lehetséges állapotát. A zaj és hasznos jel elválasztása is gyakran az eloszlások alapján történik [12]. A jól illesztett eloszlás segíthet megkülönböztetni a normál működésből és hibából származó komponenseket [10].

Az eloszlásfüggvények lehetővé teszik a hibajelek kvantitatív értelmezését, és alapot adnak a megbízható gépdiaosztikai döntésekhez. Gauss-eloszlással [14] vizsgáltam a forgási frekvencia összetevőit a 5. ábra alapján.



5. ábra Forgási frekvencia komponensei Gauss-eloszlással vizsgálva.



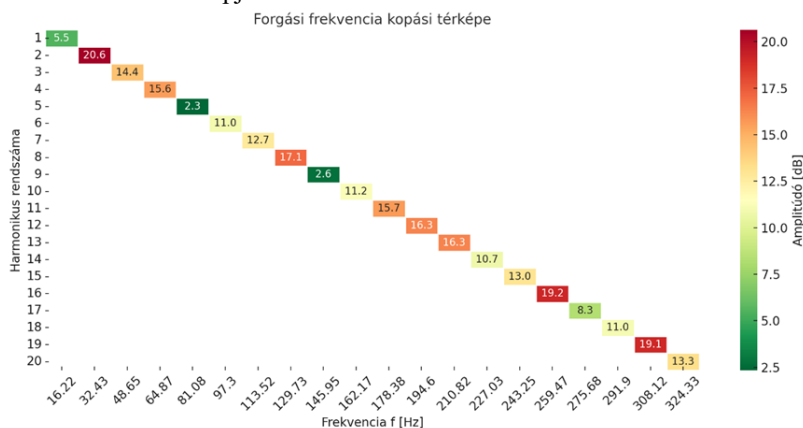
6. ábra Forgási frekvencia komponensei Poisson-eloszlással vizsgálva.

A 5-6. ábrákon a forgási frekvencia harmonikusainak amplitúdóiból készített hisztogram és a Gauss-eloszlás [14] illesztése látható. Az amplitúdók (itt a rezgés amplitúdó erősített jele) nem teljesen szimmetrikusak, de egy közelítő normáeloszlással modellezhetők. Az 5. ábra mutatja a forgási frekvencia Gauss-

eloszlását [14]. Az eredmények azt mutatják, hogy célszerű amplitúdó nagyságrend vizsgálatot is végezni, nemcsak frekvencia prioritás szerint sorolni a hibajeleket.

Poisson-eloszlás [14] kevésbé illeszkedik (6. ábra) jól ehhez a mérési eredményekhez. Ez az eloszlás inkább ritka események modellezésére alkalmas (pl. hibák száma időegységenként). Illesztési próbát célszerű lesz még bővíteni. A matematikai készlet bővítése létfontosságú. A vizsgálata zárásaként át kell térni a kopási térkép koncepciójára.

A kutatási első fázisának (tengelyütési frekvenciák rendszerezése) összegzése a 7. ábrán látható. Újdonságkutatás alapvető célja a kopási térképek fejlesztése aszinkron gépre vonatkozólag. Ennek egyik célkitűzése volt egy olyan szemléletmód kialakítása, amely amplitúdó-frekvencia-harmonikus rendszámmal ábrázol valós adatok alapján hibametriát.



7. ábra Forgási frekvencia komponenseinek kopási térképe frekvencia prioritással.

Piros a legerősebb amplitúdó (részletek a színskálán, szemléltető jelleg) Sárga: közepes értékek (részletek a színskálán, szemléltető jelleg) Zöld: nagyon kis amplitúdók (részletek a színskálán, szemléltető jelleg). Színskála segíti a vizuális kiemelést és gyors értelmezést. A vízszintes tengely a forgási frekvencia alapharmonikusa és többszörösei 1-20. rendszámig. Minden cellában: az adott harmonikus logaritmus amplitúdója [dB]. A forgási frekvencia kopási térképe segít azonosítani a gép forgórészeinek állapotát. A térkép megmutatja, hogy a harmonikus frekvenciákon mekkora a rezgés amplitúdója. Ha egy vagy több harmonikus kiemelkedik (piros színnel), az tengelyütésre, kiegyensúlyozatlanságra vagy más mechanikai hibára utalhat. A színezett cellák vizuálisan is könnyen értelmezhetők, így gyors hibafelismerést tesznek lehetővé. A zöld szín azt jelzi, hogy az adott komponens amplitúdója elhanyagolható, vagyis valószínűleg nem jelent problémát. Ez a fajta térképes megjelenítés előnyös akkor is, ha több gépet kell összehasonlítani vagy időbeli változásokat nyomon követni. Az időben készült térképekből trend is rajzolható, így előre jelezhető a

meghibásodás. Összességében ez az eszköz a prediktív diagnosztika egyik hatékony és vizuálisan értelmezhető eszköze.

Köszönetnyilvánítás

Köszönetemet fejezem ki kollégámnak és konzulensemnek Dr. Semperger Sándornak a kutatási munka során nyújtott szakmai támogatásért és együttműködésükért. Értékes javaslataik és tapasztalataik nagyban hozzájárultak a vizsgálatok pontosságához és a dolgozat szakmai színvonalához. Köszönöm a műhelyben és laborban meglévő technikai segítséget és a folyamatos támogatást.

Források

- [1] Jean-Claude Trigeassou, Electrical Machines Diagnosis, First published, 2011, Great Britain and the United States by ISTE Ltd and John & Sons, Inc. ISBN 978 1 84821 263 3
- [2] Bendiák István, Forgógépek diagnosztikai eljárásai és alkalmazási lehetőségük felmérése, Tudományos Diákköri Konferencia, Budapest, Felelős kiadó: Prof. Dr. Kovács Levente Adalbert az Óbudai Egyetem rektora, 2020, ISBN 978-963-449-204-7
- [3] Bendiák István, Aszinkron motorok mechanikai jellemzőinek vizsgálata áram jelalak-analízis módszerével, Diplomamunka, Óbudai Egyetem Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar, 2020, Budapest
- [4] Dr. Péter József, Gépszerkezettan, ÓE BGK 3033, Budapest, 2011
- [5] Dr. Kósa Csaba-Farnady Ernő-Gyuresovics Lajosné-Halassy István-Horváth Sándor-Kriza Kálmán, Rugalmas rendszerek mechanikája (Műszaki mechanika II.), ÓE BGK 271, Budapest, 2010
- [6] B. Noureddine, P. Remus, R. Raphael and S. Salim, "Rolling Bearing Failure Detection in Induction Motors using Stator Current, Vibration and Stray Flux Analysis Techniques," IECON 2020 The 46th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Singapore, 2020, pp. 1088-1095, doi: 10.1109/IECON43393.2020.9254401.
- [7] Bendiák István, Aszinkron motorok mechanikai eredetű hibáinak vizsgálata tranziens üzemállapotban. In: Molnár, György; Temesvári, Zsolt; Wühl, Tibor (szerk.) XXXIX. Kandó Konferencia 2023. Budapest, Magyarország : Óbudai Egyetem (2024) 420 p. pp. 174-195. , 22 p.
- [8] D. Bhaumik, A. Sadda and G. S. Puneekar, "Vibration Signal Analysis of Induction Motor Bearing Faults: Some Aspects," 2023 International Conference on Smart Systems for applications in Electrical Sciences (ICSSES), Tumakuru, India, 2023, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICSSES58299.2023.10200270.
- [9] A. Kabul and A. Ünsal, "A Diagnosis Method of Multiple Faults of Induction Motors Based on Vibration Signal Analysis," 2021 IEEE 13th International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives

(SDEMPED), Dallas, TX, USA, 2021, pp. 415-421, doi: 10.1109/SDEMPED51010.2021.9605511.

[10] T. A. Garcia-Calva, D. Morinigo-Sotelo, A. Garcia-Perez and R. J. Romero-Troncoso, "A Comparative Analysis of Monitoring Signals for Bearing Wear Detection in VSI-fed Induction Motors During Startup Transient," 2022 International Conference on Electrical Machines (ICEM), Valencia, Spain, 2022, pp. 1542-1547, doi: 10.1109/ICEM51905.2022.9910769.

[11] A. Darjazini, M. Karimi, M. H. Saeedinia and M. Cheraghi, "Vibration and Noise Analysis of Squirrel Cage Induction Motors with Double Non-Skewed Rotor Structure," 2022 13th Power Electronics, Drive Systems, and Technologies Conference (PEDSTC), Tehran, Iran, Islamic Republic of, 2022, pp. 212-217, doi: 10.1109/PEDSTC53976.2022.9767406.

[12] J. Du, Y. Li, Z. Yu and Z. Wang, "Research On Radial Electromagnetic Force and Vibration Response Characteristics of Squirrel-Cage Induction Motor Fed By PWM Inverter," in IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 31, no. 8, pp. 1-4, Nov. 2021, Art no. 5205304, doi: 10.1109/TASC.2021.3096501.

[13] I. Nagy, Műszaki diagnosztika I. – Rezgésdiagnosztika, Paks: Delta-3N Kft., 2006.

[14] O. Lukács, Matematikai statisztika, Budapest: Műszaki Könyvkiadó, 1999.

[15] N. Bhole and S. Ghodke, "Motor Current Signature Analysis for Fault Detection of Induction Machine—A Review," 2021 4th Biennial International Conference on Nascent Technologies in Engineering (ICNTE), NaviMumbai, India, 2021, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICNTE51185.2021.9487715.

[16] P. D. Yelpale, R. K. Jarial and A. J. Patil, "Fuzzy-based Induction Motor Fault Diagnosis Decision-Making System for Motor Current Signature Analysis," 2024 3rd International Conference for Innovation in Technology (INOCON), Bangalore, India, 2024, pp. 1-6, doi: 10.1109/INOCON60754.2024.10512034.

[17] M. S. Eddine, K. Djallel, G. Abdelhalim and M. R. Morakchi, "Comparative Study of Envelope and TKEO Demodulation Techniques for detecting Rotor bar breakage using Motor Current Signature Analysis (MCSA)," 2024 International Conference on Advances in Electrical and Communication Technologies (ICAECOT), Setif, Algeria, 2024, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICAECOT62402.2024.10828764.

AMPECA – Beágyazott fizioterápiás izomstimulációs rendszer

Ruskovics Péter

Óbudai Egyetem Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar, Tavaszmező utca 17.
Budapest 1084 rusipepe@gmail.com

Sándor Tamás

Óbudai Egyetem Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar, Tavaszmező utca 17.
Budapest 1084, sandor.tamas@kvk.uni-obuda.hu

Absztrakt: Az elektromos izomstimuláció (FES) alkalmazása a rehabilitációban és úrorvoslásban jelentős lehetőségeket rejt, azonban a meglévő rendszerek nehezek, drágák és kevés csatornát támogatnak. Ez a publikáció az AMPECA v3 prototípusát ismerteti - egy 11 grammos, moduláris izomstimulációs platformot. A rendszer CAN FD busszal maximálisan 2048 node-ot képes kezelni, teljes galvanikus izolációval. A fejlesztés célja hordozható, otthoni környezetben használható FES platform létrehozása rehabilitációhoz, úrbeli izomatrófia megelőzéshez, és agyi interfészekhez. A publikáció bemutatja a tervezési döntéseket, három generáció tapasztalatait és tesztelési eredményeket.

Kulcsszavak: izomstimuláció; FES; NMES; rehabilitáció; úrorvoslás; moduláris rendszer; CAN FD; bionikus interfész

1 Bevezetés

A funkcionális elektromos stimuláció (FES) régóta használt módszer a rehabilitációban. Az izmok elektromos impulzusokkal való ingerlése izomösszehúzódást idéz elő sérült vagy bénult végtagokban, segítve a mozgásfunkciók helyreállítását. [1-3][13] A jelenlegi FES rendszerek főbb korlátai:

- **Nagyméret és tömeg:** Többcsatornás FES eszközök több kilogramm tömegűek, hosszabb hordozásra alkalmatlanok
- **Magas költség:** Professzionális rendszerek magas költsége

- **Korlátozott csatornaszám:** Általában 4-8 csatorna, amely nem elegendő teljes test stimulációhoz
- **Klinikai használat:** Orvosi felügyelet szükséges, otthoni alkalmazásra nem tervezettek
- **Egyszerű stimuláció:** Csak izomstimulációra tervezettek, agyi interfészekkel nem kompatibilisek

Űrorvoslásban az izomatrófia súlyos probléma: 6 hónapos ISS tartózkodás során az űrhajósok izomtömegének 20-30%-át, antigravitációs izmoknál akár 33%-át elveszthetik [4][5]. Mars-misszió esetén ez kritikus kockázat [6]. A jelenlegi edzésprotokollok (ARED, futópad) nem előzik meg teljesen az izomvesztést [7]. Bed rest tanulmányok szerint a neuromuszkuláris elektromos stimuláció (NMES) hatékonyan csökkenti az izomatrófiát mikrogravitációs körülmények között [7].

Az AMPECA projekt célja:

- Kompakt, moduláris FES platform fejlesztése,
- Több száz izomcsoport stimulálásának lehetősége,
- Otthoni és űrbeli alkalmazhatóság,
- Költséghatékony, egyszerű felépítés,
- Agyi interfészekkel való kompatibilitás.

2 Rendszerspecifikáció és tervezési szempontok

2.1 Specifikációs követelmények

A rendszer specifikációit elsősorban a korábbi két verzió fejlesztése és tesztelése során szerzett gyakorlati tapasztalatok alapján került meghatározásra. Az előző változatok problémáinak és hiányosságainak elemzése után a harmadik generációs rendszer követelményeit a következő főbb szempontok szerint alakultak ki:

Biztonságos izomstimulálás (failsafe működés):

A rendszernek minden körülmények között meg kell akadályoznia a veszélyes vagy nem kívánt áramleadást. Hibadetektálásra és automatikus lekapcsolásra képesnek kell lennie. A maximálisan leadható impulzus energia szándékosan messze elmarad a veszélyes, életveszélyes tartománytól.

Hardveres egyszerűség, kis méret:

Az elektronika legyen egyszerű felépítésű, kevés alkatrészből álló, kompakt, hogy akár több száz izomcsoport moduláris stimulálása is megvalósítható legyen. Cél az alacsony tömeg elérése.

Galvanikus leválasztás:

Minden stimulációs csatornának elektromosan függetlennek kell lennie a többitől. Ez biztonsági és működési szempontból is alapvető követelmény. Ha több izomcsoportot szeretnénk egyszerre, egymástól függetlenül stimulálni, minden egyes stimulációs csatornának képesnek kell lennie a saját, külön-külön vezérelt nagyfeszültségű impulzusainak előállítására. Ez azonban magában hordozza annak a veszélyét, hogy az egyes csatornák között – ha nincs megfelelő elektromos izoláció – nem kívánt áramfolyás keletkezik [8][9].

Bővíthetőség:

A rendszerhez tetszőleges számú új modul (node) könnyen hozzáadható legyen anélkül, hogy a meglévő struktúrát jelentősen módosítani kellene.

Gyors, megbízható kommunikációs protokoll:

A modulok között alkalmazott adatkapcsolat legyen ipari szabványú, gyors és stabil, hogy a rendszer valós időben, több csatornán is hibamentesen működhessen.

Jövőbeli fejlesztések támogatása:

A hardver és a szoftver kialakítása tegye lehetővé új funkciók (pl. EEG-vezérlés, AI-alapú adaptív stimuláció) egyszerű integrálását.

2.2 Kommunikációs protokoll kiválasztása

A jelenlegi, harmadik generációs rendszerben a hangsúly már nem kizárólag az izomstimulációra, hanem elsősorban a több node együttes, összehangolt és biztonságos vezérlésére helyeződik át. Olyan kommunikációs protokoll alkalmazására van szükség, amely megbízható, nagy sebességű és egyszerűen integrálható több, egymástól galvanikusan leválasztott modul (node) között, akár nagyobb fizikai távolság esetén is.

A választás a **CAN FD (Controller Area Network Flexible Data-rate)** buszra esett, mivel ez a protokoll számos szempontból megfelel a rendszerrel szemben támasztott követelményeknek [10][11]:

- Egyszerűen implementálható, széles körben elterjedt ipari szabvány,
- A galvanikus leválasztás könnyen megvalósítható a fizikai rétegben,

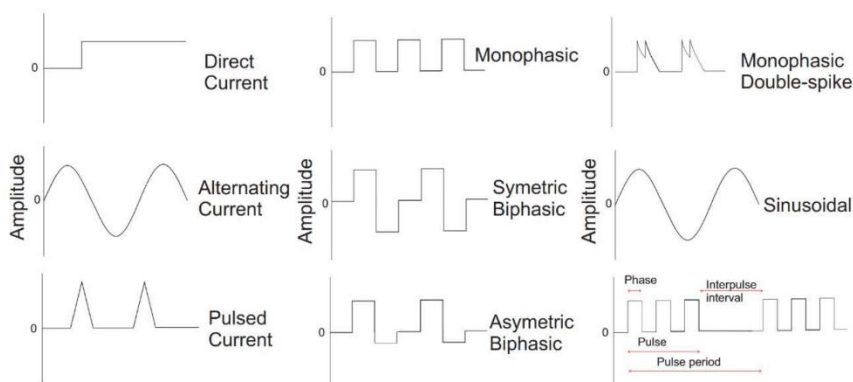
- Gyors adatátvitelt biztosít (5 Mbps), amely lehetővé teszi a valós idejű vezérlést és visszacsatolást,
- Nem szükséges saját protokoll tervezése és implementálása,
- A választott mikrovezérlő (STM32G0B1CEU6) már tartalmaz beépített CAN FD vezérlőt [10],
- Akár több méteres vagy tízméteres távolságra lévő node-ok is biztonságosan összekapcsolhatók,
- Maximálisan 2048 node címezhető egy buszon (több is lehetséges, de ez kisebb módosítást igényel a kódban),

Az előző verzióban alkalmazott I²C kommunikáció nem bizonyult megfelelőnek, mivel a protokollt alapvetően egy nyáklapon vagy rövid távolságra szánták, nem pedig több, egymástól fizikailag távolabb elhelyezkedő modul összekapcsolására.

2.3 Stimulációs paraméterek

Hullámforma:

A rendszer aszimmetrikus bifázisos impulzusokat alkalmaz izomstimulációhoz, mivel ez hatékonyan ingerli az izomszöveteket [12-14], és minimalizálja a szöveti irritációt és csökkenti az izomfáradást.



28. ábra impulzusok fajtái az izomstimulációhoz [13]

Az emberi izomszövet elektromos ingerlése során alapvető követelmény, hogy az alkalmazott impulzus elérje az ingerelni kívánt izomrostok vagy idegtörzsek küszöbértékét. Ehhez rendszerint viszonylag magas, általában 50–150 V közötti feszültségű, rövid idejű (tipikusan néhány száz mikroszekundumos) elektromos

impulzusokra van szükség, különösen akkor, ha a stimulációt nem közvetlenül az ideg, hanem a bőrön keresztül, felületi elektródákkal végezzük [8][9].

Frekvencia:

A rendszerben az impulzusfrekvencia alapértelmezetten **30 Hz** [15][16]. A tesztek során ez a frekvencia bizonyult optimálisnak: ebben a tartományban az izom összehúzódása folyamatos, nincs rángatózás, ugyanakkor a stimuláció nem válik kellemetlenné vagy fájdalmassá. Különböző tanulmányok szerint alacsonyabb frekvencia előnyösebb magasabb frekvenciával szemben [17-20]. Viszont a jövőben ezt a paramétert is állíthatóvá kell tenni, mert az izom működése nemcsak impulzus nagyságától, szélességétől, hullámformájától függ, hanem a frekvenciától is.

Mért jellemzők:

A rendszer folyamatosan monitorozza a kimeneti áramot és feszültséget impulzusonkénti mintavételezéssel. Ezeken kívül a rendszer képes az egyes stimulációs impulzusok energiaértékét (μJ), valamint az összesített leadott energiát (mJ , akkumulált) számolni. Impedancia mérés ($Z = U/I$) lehetővé teszi az elektróda-bőr kontaktus minőségének ellenőrzését [8][21].

2.4 Biztonsági funkciók

A rendszer biztonsága kiemelt fontosságú, ezért az alábbi szoftveres és hardveres védelmi funkciók kerültek beépítésre:

- **Real-time túláram- és túlfeszültség-védelem:** A rendszer folyamatosan figyeli a kimeneti áramot és feszültséget, és beavatkozik, ha a beállított határértéket túllépné.
- **Szoftveres paraméterkorlátozások:** A stimulációs paramétereket (pl. impulzusenergia, impulzusnagyság, frekvencia) a szoftver nem engedi veszélyes tartományba állítani.
- **Hardveres biztonság:** A stimulációt a mikrovezérlő PWM-jellel vezérli, így az impulzusok pontosan szabályozhatók.
- **Galvanikus izoláció:** Az összes stimulációs csatorna galvanikusan leválasztott, így az esetleges hibák, földhurok vagy szivárgóáram nem jelenthet veszélyt a felhasználóra.

3 Előző rendszerverziók tapasztalatai

3.1 Első verzió (v1) – Proof of Concept

Az első verzió célja a nagyfeszültségű impulzusgenerálás alapvető megvalósíthatóságának tesztelése volt. A prototípus egyszerű áramkörből állt, amely képes volt rövid, nagy feszültségű impulzusok leadására. A tesztek során azonban világossá vált, hogy **galvanikus izoláció nélkül** a rendszer nem biztonságos: több izom egyidejű stimulációjánál nem kívánt ingerhatások jelentkeztek a felhasználó különböző izmaiban. Ez a tapasztalat tette szükségessé a teljes áramköri izolációt a következő verzióban.

3.2 Második verzió (v2) – Mikroprocesszoros rendszer

A második verzió célja az volt, hogy a legelső, alapvetően csak a nagyfeszültségű impulzusgenerálás tesztelésére szolgáló áramkörből egy komplexebb, dedikált mikrovezérlővel és buszos kommunikációval rendelkező rendszert hozzunk létre. A fejlesztés során fontos lépés volt a **galvanikus leválasztás bevezetése**, amely már biztonságossá tette a többcsatornás működést.

Az **I²C busz** alkalmazása lehetőséget adott a modulok közötti kommunikációra, azonban hamar kiderült, hogy ennek a protokollnak komoly korlátai vannak: nagyobb távolságokon a megbízhatóság jelentősen romlik, így hosszabb távú, stabil működésre nem alkalmas.

A v2-es verzióban minden node saját mikrovezérlőt kapott, és két stimulációs csatornát lehetett vezérelni egyetlen modulon belül. Ez a megközelítés eredetileg azt a célt szolgálta, hogy ha két stimulált izom egyik elektródája közös, elegendő legyen egyetlen modul használata. Ugyanakkor az árammérés során további problémák merültek fel, mivel a két csatorna nincs izolálva, a tényleges áram a két csatornán befolyó áram összege lett volna, ezzel bonyolulttá téve a pontos mérést és vezérlést.

Összességében a v2 jelentős előrelépés volt a v1-hez képest: megjelent a dedikált mikrovezérlő, a galvanikus leválasztás és a buszos kommunikáció, amelyek mind hozzájárultak egy biztonságosabb, jobban vezérelhető rendszer kialakításához.

4 Harmadik generációs rendszer (v3)

A jelenlegi, harmadik generációs AMPECA rendszer egy moduláris, skálázható platform, amely tetszőleges számú, egyenként 11 gramm tömegű node-okból

építhető fel. Minden node önálló stimulációs egységet képez, amely egy izomcsoportot képes vezérelni. A node-ok egy közös CAN FD kommunikációs busszal kapcsolódnak egymáshoz és a központi vezérlőhöz.

Főbb komponensek:

- Mikrovezérlő: STM32G0B1CEU6 (ARM Cortex-M0+, 64 MHz, beépített CAN FD vezérlő) [10],
- Kommunikáció: CAN FD busz (5 Mbps, max 2048 node, ha kell lehet 2048-nál több is, csak módosítást igényel a szoftver),
- Tápellátás: 5V külső táp, galvanikusan izolált belső tápellátás,
- Stimulációs kimenet: Nagyfeszültségű impulzusok (150-200V tartomány),
- Mérőrendszer: Valós idejű áram- és feszültségmérés,
- Biztonsági funkciók: Túláram/túlfeszültség védelem, watchdog,
- Felhasználói interfész: RGB LED státuszjelzés, USB kommunikáció.

A rendszer energiafogyasztása node-onként $\sim 100\text{ mW}$ aktív stimuláció során. Egy 50 node-os teljes test stimulációs rendszer $\sim 5\text{ W}$ aktív teljesítményt igényel, ami hordozható alkalmazásokhoz és őrálomásokon való használatra is elfogadható.



29. ábra Harmadik generációs node

5 Jövőbeli alkalmazási területek

5.1 Rehabilitáció

Az elektromos izomstimulációs terápia jelenlegi korlátai között szerepel, hogy a meglévő FES rendszerek klinikai környezetre korlátozódnak. Az AMPECA fejlesztésének célja olyan platform létrehozása, amely otthoni környezetben is használható, orvosi felügyelet nélkül. Jelenleg ez még nem valósult meg, a rendszer prototípus állapotban van, azonban a moduláris architektúra jó alapot nyújt ilyen alkalmazásokhoz.

A tervezett alkalmazási területek:

- Gerincsérültek számára alsó végtagi stimuláció,
- Stroke-betegek kézfunkciós rehabilitációja,
- Izomatrófia megelőzése különböző betegcsoportoknál,
- Jövőben részleges/teljes mozgáshelyreállítás.

A moduláris felépítés lehetővé teszi, hogy minden izomcsoport függetlenül paraméterezhető legyen, és csak a szükséges területeken kerüljön alkalmazásra a stimuláció.

5.2 Űrkutatás és az izomatrófia megelőzése

A mikrogravitáció jelentős izomatrófiát okoz: 6 hónapos ISS tartózkodás során az űrhajósok izomtömegének 20-30%-át [4][5], antigravitációs izmoknál akár 33%-át elveszthetik [6]. Mars-misszió esetén ez kritikus probléma [7].

A jelenlegi edzésprotokollok (ARED, futópad) napi 2-2,5 órával sem előzik meg teljesen az izomvesztést [7].

AMPECA előnyei űrben:

- **Kompakt méret:** 11 g/node, minimális helyigény,
- **Alacsony fogyasztás:** ~100 mW/node,
- **Passzív használat:** Alvás közben is működik, nem vonja el az időt,
- **Skálázhatóság:** Teljes test izomzata stimulálható,
- **Validált hatékonyság:** Bed-rest tanulmányok igazolják az NMES hatékonyságát mikrogravitációban [7].

5.3 Bionikus interfész – Jövőbeli perspektíva

Az AMPECA moduláris, izolált architektúrája lehetővé teszi **bionikus interfészként** való működést - az agyból érkező jelekkel vezérelve az izmokat. Ez eltér a hagyományos FES rendszerektől, amelyek csak stimulációra készültek, nem agy-izom összekapcsolásra. A rendszer minden izomcsoport független, valós idejű vezérlését biztosítja, ami alapvető követelmény agyi interfész használata esetén.

EEG/BCI vezérlés:

EEG vagy implantált elektródák (pl. Neuralink) segítségével a rendszer közvetlenül olvashatja a mozgásszándékot, és valós időben izomkontrakciókká alakítja. Ez teljes mozgáshelyreállítást tehet lehetővé gerincsérülteknél - az agy jelei közvetlenül aktiválják a bénult végtagot.

Visszacsatolás:

A rendszer EMG/szenzoros visszacsatolással érzékeli a végtagok állapotát, adaptív szabályozást biztosítva. Ez finomabb mozgásokat tesz lehetővé összetett minták (járás, megfogás) esetén.

MI-alapú állássegítés:

Lehetséges kiterjesztés a mozgásminták (állás, járás) stabilizálását segítő, egyszerű korrekciós algoritmusok integrációja; cél a motoros funkciók alapvető támogatása.

6 Tesztelés és validálás

6.1 Saját tesztelés

A rendszer funkcionalitását saját teszteléssel került validálásra. A vizsgálatok során mérésre került, hogy mely paraméterek (frekvencia, impulzusenergia) milyen mértékű izomösszehúzódást vagy fájdalomérzetet váltanak ki, illetve mely beállítások érezhetőek komfortosnak vagy kevésbé kellemetlennek [16].

Tesztelési eredmények:

- **30 Hz-es alapfrekvencia:** Folyamatos, rángatásmentes kontrakció, nincs kellemetlen rángatózás, [15][16]
- **Szubjektív fájdalomérzet:** Alacsony, jó komfortérzet a tesztelt paraméterek mellett,

- **Izomfáradás:** Csak hosszabb (10+ perc) folyamatos stimuláció után jelentkezett,
- **Biztonság:** Semmilyen veszélyes vagy nem kívánt reakció nem lépett fel.

6.2 Izomfáradás mérése

A vizsgálat célja a választott stimulációs hullámforma, frekvencia és elektrodaelrendezés által előidézett izomfáradás mértékének meghatározása volt, ezáltal pontosabb képet kapva az alkalmazott paramétereknek az adott izom működésére és fáradékonyságára gyakorolt hatásáról.

Módszer:

A stimulációt hidrogéles elektródákkal végeztem a bőrömön [21], 52 μJ energiával impulzusonként. A stimulációs ciklusok felépítése:

- 1 másodperc összehúzás (fokozatos növekedés),
- 1 másodperc folyamatos stimuláció,
- 2 másodperc elernyedés (fokozatos csökkenés),
- 1 másodperc szünet.

A ciklusokat 30 Hz-es frekvenciával lett végrehajtva. A teljes mérési idő 24 perc volt.

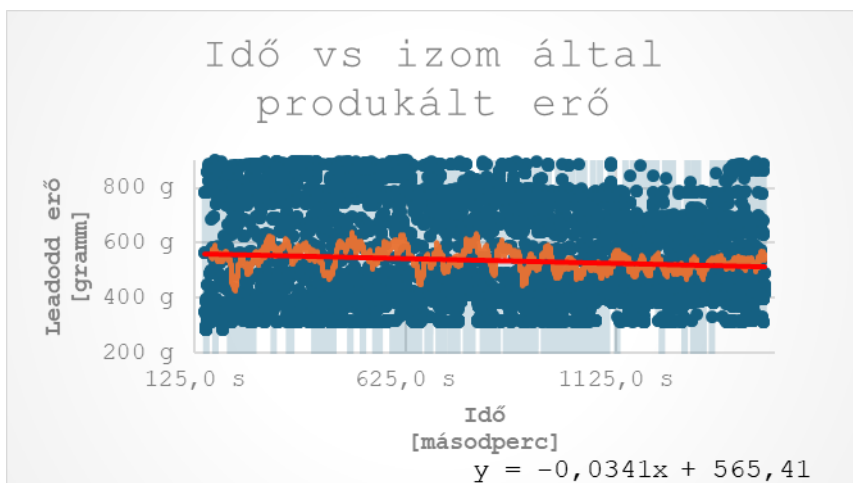
A teljes mérés alatt összesen **1,12 Joule** energia került leadásra az izomnak.

Adatgyűjtés:

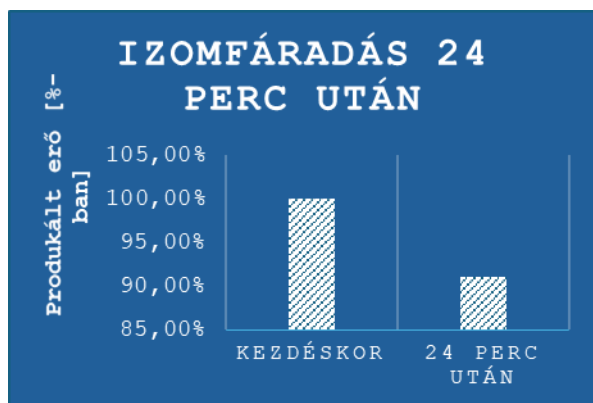
Az izom által kifejtett erőt mérése konyhai mérleggel történt. A mérési adatokat videón rögzítve, majd digitalizálva - összesen kb. 1600 adatpontot kapunk. A kiindulási értékeket az első izomösszehúzódások adták meg, ezekhez történt a fáradás viszonyítása.

Eredmények:

- A stimuláció kezdeti értékeihez képest 24 perc után **8,88%-os csökkenés** az izomerőben,
- A mérési adatok jelentős zajt tartalmaztak, de egy 127 mintás mozgóátlag és trendvonal segítségével jól kirajzolódott a fáradási folyamat,
- A fáradási tendencia szinte lineáris volt a mérés során.



30. ábra A stimulált izom által produkált erő az idő függvényében



31. ábra Az izomfáradás mértéke

Megjegyzések:

A mérés során nehéz volt teljesen kiküszöbölni a tudatos izommozgásokat, néha akaratlanul is rásegítettem az izomösszehúzódnásra, ez némi hibát vihetett az eredményekbe. A fáradás enyhén, de érezhetően jelentkezett - diszkomfortot nem tapasztaltam.

A vizsgálat alapján a választott stimulációs paraméterek mellett az izomfáradás mértéke mérsékelt volt, a leadott energia nem okozott drasztikus teljesítménycsökkenést vagy kellemetlenséget. A fáradási folyamat lassan, szinte lineárisan zajlott, ami arra utal, hogy ilyen impulzusenergiával és ciklusokkal hosszú távon is biztonságosan alkalmazható a stimuláció.

7 Jövőbeli fejlesztési irányok

7.1 Rövidtávú célok

- **Központi vezérlőegység kifejlesztése:** A node-ok összehangolt vezérlésére szolgáló központi egység hardver és szoftver fejlesztése,
- **Orvosi eszköz szabványoknak való megfelelés:** IEC 60601 és egyéb szabványok követelményeinek teljesítése,
- **Többcsatornás rendszer validálása:** 10-20 node-os rendszer gyakorlati tesztelése, teljes test stimuláció,
- **AI-alapú mozgásasszisztencia:** Gépi tanulási algoritmusok kifejlesztése állás és járás stabilizálására,
- **Végleges tápellátási megoldás:** Li-Ion akkumulátoros tápellátás kifejlesztése, 6-8 óra üzemidő biztosítása.

7.2 Középtávú célok

- **Űrállomáson való tesztelés:** ESA/NASA együttműködés, az AMPECA rendszer tesztelése mikrogravitációs környezetben (ISS vagy kereskedelmi űrállomások),
- **Agyi interfész (BCI/EEG) integráció:** EEG-alapú vagy implantált elektródákkal (pl. Neuralink) való összekapcsolás, teljes mozgáshelyreállítás gerincsérülteknél,
- **Bionikus platform:** Az AMPECA nem csak izomstimulációs rendszer, hanem agy-izom interfész – az emberi idegrendszer és az elektromos stimuláció közvetlen összekapcsolása.

7.3 Hosszútávú célok

- **Energiahatékonyság növelése:** A jelenlegi ~100 mW/node fogyasztás további csökkentése,
- **Miniaturizálás:** A node méret további csökkentése, akár 5-7 gramm alá,
- **Szenzoros integráció:** EMG, nyomás-, érintésérzékelők beépítése a node-okba, más rendszerbe, így valós idejű visszacsatolás biztosítása,

8 Összefoglalás

Jelen publikáció az AMPECA harmadik generációs prototípusát mutatta be, amely egy kompakt (11 g/node), moduláris és skálázható izomstimulációs platform. A rendszer CAN FD kommunikációs busszal képes akár 2048 izomcsoport egyidejű, független vezérlésére, galvanikus izoláció mellett.

A fejlesztés három generáción keresztül zajlott: az első verzió igazolta a nagyfeszültségű impulzusgenerálás megvalósíthatóságát, a második verzió bevezette a galvanikus leválasztást és a mikrovezérlő-alapú architektúrát, míg a jelenlegi, harmadik verzió a CAN FD kommunikációval és az energia-alapú vezérléssel biztosítja a skálázhatóságot és a megbízhatóságot.

A rendszer alkalmazási területei:

- **Rehabilitáció:** Gerincsérültek, stroke-betegek, neurodegeneratív betegségek – hordozható, otthoni használatra alkalmas lehet,
- **Űrorvoslás:** Izomatrófia megelőzése Mars-missziók során – kompakt, energiahatékony, passzívan viselhető [7],
- **Bionikus interfész:** Agyi interfészekkel (EEG, BCI) kombinálva teljes mozgáshelyreállítást tehet lehetővé.

A rendszer jelenlegi állapota: **működőképes v3 prototípus**, saját izmaimon tesztelve, 30 Hz-es alaphérvenciával, alacsony fájdalomérzet mellett.

A következő lépések: klinikai tesztek, többsatornás rendszer validálása, AI-alapú adaptív vezérlés kifejlesztése, valamint hosszú távon űrállomáson való tesztelés és agyi interfészekkel való integráció.

Az AMPECA projekt célja, hogy az elektromos izomstimuláció a rehabilitáció, az űrorvoslás és a bionikus interfészek alapvető eszközévé váljon – egy moduláris bioelektronikai platform, amely ma izomstimulációra szolgál, holnap pedig bionikus interfészként köti össze az emberi agyat és az izmokat.

8 Irodalomjegyzék

- [1] M. C. Kutlu, “A Home-Based Functional Electrical Stimulation System for Upper-Limb Stroke Rehabilitation,” 2017.
- [2] N. M. Malešević, “A multi-pad electrode based functional electrical stimulation system for restoration of grasp,” Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation, vol. 9, p. 66, 9 2012.

- [3] R. G. Barelli, V. F. Avelino and M. Cláudia, "STIMGRASP: A Home-Based Functional Electrical Stimulator for Grasp Restoration in Daily Activities," *Sensors*, vol. 23, no. 1, pp. 10-10, 12 2022.
- [4] S. Trappe, "Exercise in space: human skeletal muscle after 6 months aboard the International Space Station," *Journal of Applied Physiology*, vol. 106, no. 4, pp. 1159-1168, 4 2009.
- [5] O. J. Juhl, E. G. Buettmann, M. A. Friedman, R. C. DeNapoli, G. A. Hoppock and H. J. Donahue, "Update on the effects of microgravity on the musculoskeletal system," *npj Microgravity*, vol. 7, no. 1, pp. 1-15, 7 2021.
- [6] T. Trappe, P. Tesch, B. Alkner and S. Trappe, "Microgravity-induced skeletal muscle atrophy in women and men: implications for long-duration spaceflights to the Moon and Mars," *Journal of Applied Physiology*, vol. 135, no. 5, pp. 1115-1119, 11 2023.
- [7] A. Bosutti, "Microgravity-induced changes in skeletal muscle and possible countermeasures: What we can learn from bed rest and human space studies," *Experimental Physiology*, 3 2025.
- [8] J. L. Vargas Luna, M. Krenn, J. A. Cortés Ramírez and W. Mayr, "Dynamic Impedance Model of the Skin-Electrode Interface for Transcutaneous Electrical Stimulation," *PLOS ONE*, vol. 10, no. 5, p. e0125609, 5 2015.
- [9] D. C. De Souza, M. D. C. Gaiotto, G. N. N. Neto, M. C. F. De Castro and P. Nohama, "Power amplifier circuits for functional electrical stimulation systems," *Research on Biomedical Engineering*, vol. 33, no. 2, pp. 144-155, 6 2017.
- [10] STMicroelectronics, Introduction to timers for STM32 MCUs, 2025.
- [11] R. D. Andrade, K. N. Hodel, J. F. Justo, A. M. Lagana, M. M. Santos and Z. Gu, "Analytical and Experimental Performance Evaluations of CAN-FD Bus," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 21287-21295, 1 2018.
- [12] R. Rabello, M. Fröhlich, N. A. Maffioletti and M. A. Vaz, "Influence of Pulse Waveform and Frequency on Evoked Torque, Stimulation Efficiency, and Discomfort in Healthy Subjects," *American Journal of Physical Medicine & Rehabilitation*, vol. 100, no. 2, pp. 161-167, 7 2020.
- [13] M. Kono and J. Rekimoto, "wavEMS: Improving Signal Variation Freedom of Electrical Muscle Stimulation," in *2020 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*, 2019.
- [14] M. Ilves, "Functional electrical stimulation for facial pacing: Effects of waveforms on movement intensity and ratings of discomfort," *Biomedical Signal Processing and Control*, vol. 60, p. 101992, 7 2020.

- [15] J. A. Mettler, D. M. Magee and B. M. Doucet, "Low-frequency electrical stimulation with variable intensity preserves torque," *Journal of Electromyography and Kinesiology*, vol. 42, pp. 49-56, 10 2018.
- [16] B. Guzmán-González, P. Llanos, J. Calatayud, N. A. Maffiuletti and C. Cruz-Montecinos, "Effect of neuromuscular electrical stimulation frequency on postprandial glycemia, current-related discomfort, and muscle soreness. A crossover study," *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism*, vol. 44, no. 8, pp. 834-839, 8 2019.
- [17] M. T. Souza and W. M. Medeiros, "Muscle damage induced by neuromuscular electrical stimulation (NMES) with frequencies of 30 Hz and 100 Hz," *Acta Fisiátrica*, vol. 22, no. 1, 2015.
- [18] T. Kesar and S. Binder-Macleod, "Effect of frequency and pulse duration on human muscle fatigue during repetitive electrical stimulation," *Experimental Physiology*, vol. 91, no. 6, pp. 967-976, 11 2006.
- [19] T. Popesco, Q. Gardet, J. Bossard, N. A. Maffiuletti and N. Place, "Centrally mediated responses to NMES are influenced by muscle group and stimulation parameters," *Scientific Reports*, vol. 14, no. 1, 10 2024.
- [20] J. A. Mettler, D. M. Magee and B. M. Doucet, "Low-frequency electrical stimulation with variable intensity preserves torque," *Journal of Electromyography and Kinesiology*, vol. 42, pp. 49-56, 10 2018.
- [21] T. Keller and A. Kuhn, "Electrodes for transcutaneous (surface) electrical stimulation," *Journal of Automatic Control*, vol. 18, no. 2, pp. 35-45, 2008.

The Employee as a Data Source: A Prospective View on Biosensor Technologies in the Workplace

D. Marton

Márton Dávid, Obuda University, Doctoral School on Safety and Security Sciences [8 Népszínház utca, 1081, Budapest, Hungary],
davidmarton993@gmail.com

C. Otti

Dr. Otti Csaba Phd, Obuda University, Institute of Safety Science and Cybersecurity, Banki Donat Faculty of Mechanical and Safety Engineering [8 Népszínház utca, 1081, Budapest, Hungary], otti.csaba@uni-obuda.hu

Abstract: This study explores the interpretation of the employee as a source of data and the emerging idea of the quantified workplace. It examines how employees perceive the future spread of biosensor technologies in the world of work, based on an online survey of 556 participants and an expert interview with futurist Dr. Árpád Rab. Results show that 61.5% of respondents considered it likely that biosensors will become widespread in workplaces within the next 20 years — significantly above the professional acceptance threshold. The findings suggest a growing openness among employees toward these technologies, which are expected to spread gradually and voluntarily, especially in safety-critical sectors. Their integration, however, will require transparent and ethical data practices to ensure trust in the future workplace.

Keywords: biosensors; human resource management; data protection; employee monitoring; quantified workplace;

1 Introduction

The emergence of new technologies has always evoked mixed emotions throughout human history: on the one hand, it inspires excitement and hope, while on the other, it raises uncertainty and concern about the consequences of change. Today, technological development permeates not only economic processes but every aspect of human life and work, creating an increasingly close relationship between humans and data. The appearance of biosensor technologies opens a new dimension in this relationship, as the human body itself becomes one of the most important sources of data collection and analysis. This transformation carries significant opportunities and challenges, especially in the world of work, where employee performance, health, and well-being can not only be observed but also measured, analyzed, and even predicted. At the same time, it raises the question of

how the employee can be interpreted as a source of data and what impact this perspective may have on the workplaces of the future.

The history of biosensors dates back to 1962, when Leyland C. Clark developed the concept of the enzyme electrode [1], [2]. The modern interpretation of the term is associated with Anthony P. F. Turner, who played a pivotal role in shaping the scientific concept of biosensors during his research at Cranfield University in the United Kingdom in the 1980s. According to Turner, a biosensor is an analytical device that combines a biological sensing element with a physicochemical transducer, enabling the performance of complex bioanalytical measurements [3].

Modern biosensors are complex systems that integrate a bioreceptor, transducer, electronic processing unit, and display, enabling the real-time digital measurement and visualization of biological signals [4]. In recent years, the technology has undergone rapid development, shifting from laboratory-based applications toward practical, human-centered uses. Systems that were once designed primarily for research purposes have now evolved into portable, multifunctional devices suitable for everyday life. According to international literature, biosensors increasingly influence not only healthcare but also organizational and decision-support processes [5], [6]. This trend has led to the emergence of the *quantified workplace* concept, in which data on employees' behavior, performance, and well-being become part of organizational decision-making. Moore, Piwek, and Roper [6] emphasize that such self-tracking systems may serve not only for productivity monitoring but also for supporting adaptive and learning processes that enhance employees' self-awareness, flexibility, and workplace well-being.

In recent years, the spread of wearable devices has been driven by the development of cheaper and miniaturized sensors as well as advances in mobile informatics. Their applications extend to monitoring physiological parameters (such as heart rate, body temperature, and respiration), biochemical signals (including sweat, tears, and saliva), as well as movement, ergonomics, and environmental factors [5]. Biosensors also offer new opportunities in the field of human resource management. Although the technology holds significant potential, its application in this area remains in an early stage. The introduction of workplace biosensors can enhance employee safety, enable objective monitoring of performance and health, and support overall well-being [7], [6]. Numerous wearable biosensors are already available for personal use, and they are expected to appear increasingly in workplace environments as well [8], [9]. These development trends foreshadow a future in which the employee becomes not only a participant in work processes but also a source of data through which organizations can make more precise, personalized, and predictive decisions—thus realizing the practical vision of the *quantified workplace*.

2 Methods

This study applied a mixed-methods research design, in which a targeted literature review was complemented by a quantitative online survey and a prospective, semi-structured expert interview with futurist Dr. Árpád Rab. The aim of the design was triangulation—that is, comparing statistical findings with future-oriented qualitative reflections in order to explore the concept of the “employee as a data source.”

In the quantitative phase, responses from **n = 556 Hungarian employees** were analyzed (age range: 18–65 years; the majority held higher education degrees and worked in white-collar occupations). Data collection took place online, on a voluntary and anonymous basis, between December 2024 and March 2025. The questionnaire consisted of structured blocks containing 1–6 Likert-scale items, dichotomous questions, and open-ended items. Recruitment was conducted openly through online channels. Participants responded using a six-point Likert scale (1 = not at all likely, 6 = very likely). For analytical purposes, values 4–6 were defined as the category representing respondents who considered the widespread adoption of the technology to be likely.

The prospective component of the study examined societal perceptions regarding the future spread of biosensor technologies. The key question was the following: *“In your opinion, how likely is it that biosensor devices will become widely used in two thirds of workplaces within the next 20 years?”*

The aim of the hypothesis testing was to determine whether the level of societal perception reaches the minimum threshold for professional acceptance. The empirical foundation for this benchmark was provided by a study published in Human Factors, which surveyed 952 Occupational Safety and Health (OSH) professionals. According to the results, 53.5% of respondents supported, and an additional 27.3% indicated conditional openness (“might be interested”) toward the workplace use of wearable sensors [10]. As this study represents one of the largest peer-reviewed empirical sources on workplace acceptance of wearable technologies, the present research adopted $p_0 = 0.535$ as a professionally grounded threshold.

Accordingly, the hypothesis tested in this study was formulated as follows:

H₀: Less than 53.5% of respondents consider it likely (values 4–6) that biosensor technologies will become widespread—present in at least two-thirds of workplaces—within the next 20 years.

H₁: At least 53.5% of respondents consider it likely (values 4–6) that biosensor technologies will become widespread—present in at least two-thirds of workplaces—within the next 20 years.

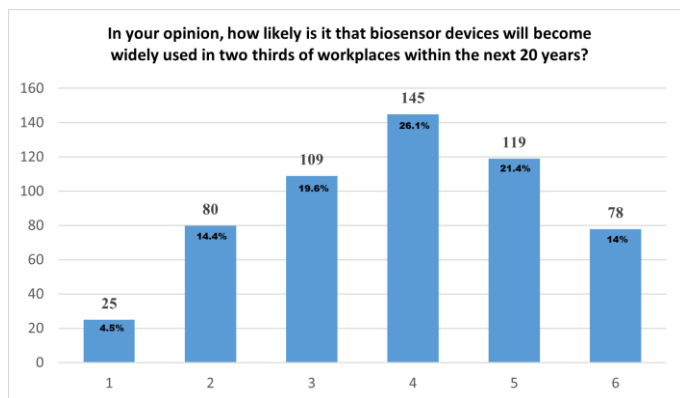
The combined interpretation of the quantitative and qualitative results provided methodological triangulation, that is, the integrated understanding of statistical

attitudes and futurist reflections. This integration reinforces the prospective, future-oriented approach of the research.

3 Results

This study forms part of an ongoing multi-stage research project examining the social, ethical, and safety-science implications of workplace applications of biosensor technologies. The analysis presented here constitutes the prospective component of the project and explores the extent to which respondents consider the widespread adoption of biosensor devices likely over the next twenty years. The survey question examined in this analysis was as follows: *“In your opinion, how likely is it that biosensor devices will become widely used in two thirds of workplaces within the next 20 years?”*

Based on the analysis of 556 responses (see Figure 1), the distribution showed a moderately balanced pattern on the six-point Likert scale—where value 1 indicated “not at all likely” and value 6 indicated “very likely.” The frequency of responses was as follows: value 1: 25 responses (4.5%), value 2: 80 responses (14.4%), value 3: 109 responses (19.6%), value 4: 145 responses (26.1%), value 5: 119 responses (21.4%), and value 6: 78 responses (14.0%). When aggregating response categories 4–6—which represent perceptions of the technology’s spread as “likely” or “very likely”—61.5% of participants indicated that they consider it at least somewhat likely that biosensor technologies will become widespread in two-thirds of workplaces within the next 20 years.



8. Figure
Perceived Future Adoption of Biosensors

The threshold value of 53.5% was derived from previously published empirical findings from one of the largest peer-reviewed studies on workplace acceptance of

wearable technologies. As this benchmark was already discussed in the Methods section, it is referenced here only briefly to contextualize the hypothesis test.

The relationship between age and the 20-year outlook showed virtually no meaningful association, and the mean values across age groups differed only minimally. A similar pattern emerged when comparing generations: Generation Z (mean = 3.87), Generation Y/Millennials (mean = 3.85), and Generation X (mean = 3.90) expressed nearly identical future expectations. Although the Baby Boomer group showed a higher mean score (4.60), this difference cannot be considered reliable due to the very small subsample size ($n = 5$). Gender-based differences were also modest: men reported a slightly higher average score (4.02) than women (3.83), although both groups were predominantly positioned in the positive range of the scale. Regarding educational attainment, respondents with secondary education (mean = 4.08) and those holding a scientific degree (mean = 4.25) were somewhat more optimistic compared to respondents with higher education degrees (mean = 3.74); however, these differences should be interpreted cautiously due to the smaller subgroup sizes.

For clarity, the hypothesis tested in this study is restated here:

H₀: Fewer than 53.5% of respondents consider it likely (values 4–6) that biosensor technologies will become widespread—present in at least two-thirds of workplaces—within the next 20 years.

H₁: At least 53.5% of respondents consider it likely (values 4–6) that biosensor technologies will become widespread—present in at least two-thirds of workplaces—within the next 20 years.

The observed proportion of 61.5% was significantly higher than the threshold value of $p_0 = 0.535$, allowing the null hypothesis to be rejected and thereby supporting the alternative hypothesis. A one-sample proportion test was applied to determine whether the observed proportion differed from the expected value derived from the literature. The results indicate that the majority of respondents already consider the widespread adoption of biosensor technologies in the workplace to be realistic, suggesting a strengthening of technological trust and a shift in attitudes toward acceptance. Overall, the findings reflect a form of cautious optimism: most respondents believe that biosensor systems will naturally become integrated into the world of work over the coming decades, provided that their implementation occurs under transparent, voluntary, and ethically sound conditions.

In light of the qualitative findings, futurist Dr. Árpád Rab emphasized that the development of biosensor technologies may fundamentally reshape the relationship between humans and work in the coming decades, as the employee can be interpreted as a source of data. Such data may enable organizations to monitor safety, performance, and well-being in an increasingly data-driven manner. According to Rab, the spread of biosensors is likely to be gradual and predominantly voluntary, emerging first in industries where health and safety are

critical—such as healthcare, chemical manufacturing, or air-traffic control. The success of these technologies, however, will depend on transparent data management and ethical implementation. Employee acceptance requires that individual benefits—such as preventing overload, stress, or risky physiological states—are tangible, and that introduction occurs through voluntary, pilot programs. Artificial intelligence is expected to play a key role in this process by contextualizing the collected data and transforming it into decision support. As the technology becomes increasingly “invisible,” its integration into everyday work routines will deepen, while human data itself becomes one of the most valuable resources in work organization.

4 Discussion

The quantitative and qualitative findings both indicate that the social acceptance and workplace adaptation potential of biosensor technologies are gradually strengthening. A majority of respondents consider it realistic that these devices could become present in a significant proportion of workplaces within the next 20 years, signaling growing technological trust and a forward-looking openness to innovation. The expert interview reinforces this pattern, suggesting that the introduction of biosensor systems in the coming decades will be shaped less by technological limitations and more by social and ethical considerations. Trust, transparent data management, and voluntary, well-communicated implementation will remain the key conditions for successful adoption.

These results can also be interpreted in a broader context, as the role of data in the world of work has fundamentally shifted: in the digital economy, data has become a central resource for organizational decision-making and competitiveness, and the notion of the employee as a “source of data” has gained increasing prominence. The prospective findings—consistent with international trends—suggest that societal attitudes are evolving favorably toward the future use of biosensor technologies. The methodological triangulation, integrating survey data with futures-oriented expert insights, further indicates that the societal prerequisites for technological diffusion are already partly in place, although the ultimate success of implementation will continue to depend on trust and ethical data governance.

5 Conclusion

The findings of this study indicate that the future spread of biosensor technologies in the workplace is not solely a technological development, but one that raises strategic, organizational, and human considerations as well. The future employee is entering a work environment in which biosensors and other advanced technologies become deeply embedded in everyday processes, shaping how work

is monitored, supported, and experienced. This evolution represents more than a trend: it signals a transformative shift in workplace dynamics, consistent with the broader changes described by Chappuis and Rizzo, who highlight how technology-driven environments redefine the nature and design of work itself [11]. As biosensor integration accelerates, the responsibility placed on HR professionals, policymakers, and organizational leaders also increases. Ensuring that data is used in ways that protect and enhance human well-being—rather than diminish it—will be essential for maintaining trust and legitimacy.

In the workplaces of the future, the interpretation and use of data will depend not only on technological capacity but equally on human factors such as transparency, voluntariness, and ethical data governance. Biosensor systems have the potential to elevate decision-making, safety, and well-being to a new level, but their success will hinge on whether organizations can introduce them in ways that are perceived as fair, beneficial, and respectful. Ultimately, the key question is not whether employees become sources of data—this transformation is already underway—but how organizations can create value from such data without compromising human dignity, trust, or transparency.

Acknowledgement

I would like to express my sincere gratitude to Dr. Csaba Otti for his professional mentorship and to Dr. Árpád Rab for the time he devoted to me.

References

- [1] G. G. Guilbault and J. G. Montalvo, Jr., “Urea-specific enzyme electrode,” *Journal of the American Chemical Society*, vol. 91, 1969. doi: 10.1021/ja01036a083
- [2] E. H. Yoo and S. Y. Lee, “Glucose biosensors: An overview of use in clinical practice,” *Sensors*, vol. 10, 2010. doi: 10.3390/s100504558
- [3] A. P. F. Turner, “Biosensors: Sense and sensibility,” *Chemical Society Reviews*, vol. 42, no. 12, 2013. doi: 10.1039/c3cs35528d
- [4] P. Mishra and P. P. Sahu, *Biosensors in Food Safety and Quality: Fundamentals and Applications*, CRC Press, 2022. doi: 10.1201/9780429259890
- [5] D. Bhatia, S. Paul, T. Acharjee, and S. S. Ramachairy, “Biosensors and their widespread impact on human health,” *Sensors International*, vol. 4, 2023. doi: 10.1016/j.sintl.2023.100257
- [6] P. Moore and L. Piwek, “Regulating wellbeing in the brave new quantified workplace,” *Employee Relations*, vol. 39, no. 3, 2017. doi: 10.1108/ER-06-2016-0126

- [7] I. Ajunwa, K. Crawford, and J. Schultz, "Limitless worker surveillance," *California Law Review*, vol. 105, 2017.
- [8] V. Dubljević, I. C. McCall, and J. Illes, "Neuroenhancement at work: Addressing the ethical, legal, and social implications," in *Organizational Neuroethics*, J. Martineau and E. Racine, Eds. Cham: Springer, 2020, pp. 87–103. doi: 10.1007/978-3-030-27177-0_7
- [9] A. Sharma, M. Badea, S. Tiwari, and J. L. Marty, "Wearable biosensors: An alternative and practical approach in healthcare and disease monitoring," *Molecules*, vol. 26, no. 3, 2021. doi: 10.3390/molecules26030748
- [10] M. C. Schall, Jr., R. F. Sesek, and L. A. Cavanaugh, "Barriers to the adoption of wearable sensors in the workplace: A survey of occupational safety and health professionals," *Human Factors*, vol. 60, no. 3, 2018. doi: 10.1177/0018720817753907
- [11] I. Chappuis and G. Rizzo, *HR Futures 2030: A Design for Future-Ready Human Resources*. London: Routledge, 2022.

July 7, 2005 from a telecommunications perspective

Zoltán Géza Tóth

Obuda University Kandó Kálmán Faculty of Electrical Engineering

Institute of Electronics and Communication Systems

Department of Telecommunication

1084, Budapest

Tavaszmező utca 15-17.

toth.zoltan@kvk.uni-obuda.hu

Abstract: This document summarizes the events of the July 7, 2005 terrorist attack in London and its background, presents the British emergency procedures, with particular emphasis on communication, and examines the communication improvements implemented in the London Underground since then. This summary is based mainly on material available on the internet, largely from British newspapers and websites, supplemented by material found on Wikipedia, where I have checked the sources individually.

1. Introduction

When I began writing this summary, I thought it would be enough to deal only with the London terrorist attack and the events surrounding emergency communications, but life, as we know, constantly overrides our previous decisions. This is what happened now, as on May 1, 2007, the British press reported exclusively on another terrorism trial related to the July 7 bombings. [1] [2] [3]

2. Background information



Figure 1. A MI5 photo (top) from 2004 shows Shehzad Tanweer and Mohammad Sidique Khan, who participated in the 2005 bombings as suicide bombers. The bottom photo shows Khan working as a teaching assistant. [4]

In connection with the May 1 court case, it caused quite a stir that a photo taken by MI5 showed the future London attackers together. The photo was taken in 2004, more than a year before the attack, while Omar Khyam was under surveillance. Khyam is the leader of an Al-Qaeda terrorist cell who had been under constant surveillance by MI5 since 2003 and was sentenced to life imprisonment on May 1, 2007, for planning another attack. The estimated cost of the surveillance reached £50 million. MI5 was forced to issue an explanation regarding the case, which can be read on its official website. [5] [6]

3. Events of July 7, 2005, in chronological order [7]

1. Close antecedents – positive English events:
 - a. A few days earlier, the Live 8 concert sent a powerful message to world leaders about the need for development in Africa.
 - b. On July 6, London won the right to host the 2012 Olympic Games.
 - c. On July 7, G8 leaders met in Gleneagles.

2. Based on closed-circuit television (CCTV) footage and eyewitness accounts, the following sequence of events was reconstructed (irrelevant details omitted from the original description):

03:58 A blue Nissan Micra rented by Shehzad Tanweer was recorded by a camera in Leeds.

05:07 A red Fiat Brava arrives at the Luton station car park. Jermaine Lindsay arrives alone and waits. (CCTV)

06:49 The Micra arrives in Luton (a suburb of London) and three people get out. They take four backpacks from the trunks of the Brava and Micra and continue on their way. (CCTV)

07:15 Lindsay, Hussain, Tanweer, and Khan enter Luton station (CCTV)

07:21 They get on a train heading to London King's Cross station (CCTV). Based on their behaviour, experts estimate the weight of their backpacks to be around 2-5 kg.

08:26 After the train arrives, they head towards the entrance to the London Underground system. (CCTV) The four terrorists then go their separate ways in four different directions.

08:50 Three terrorists execute suicide bombings on three different lines.

Tanweer bombing kills 8 and injures 171 at Liverpool Street station.

Khan kills 7 people and injures 163 others on Edgware Road

Lindsay's bombing on the Piccadilly Line causes the most casualties, as the train is packed with passengers. The death toll is 27, with more than 340 injured.

08:55 Hussein gets off the King's Cross line at Euston Road. He tries to call his colleagues from his cell phone, which is recorded by the control centre.

09:00 Hussein buys a 9V battery in one of the station's shops, presumably for the explosive device.

09:47 Hussein detonates his bomb on the number 30 bus at Tavistock Square.
The explosion kills 14 people and injures more than 110

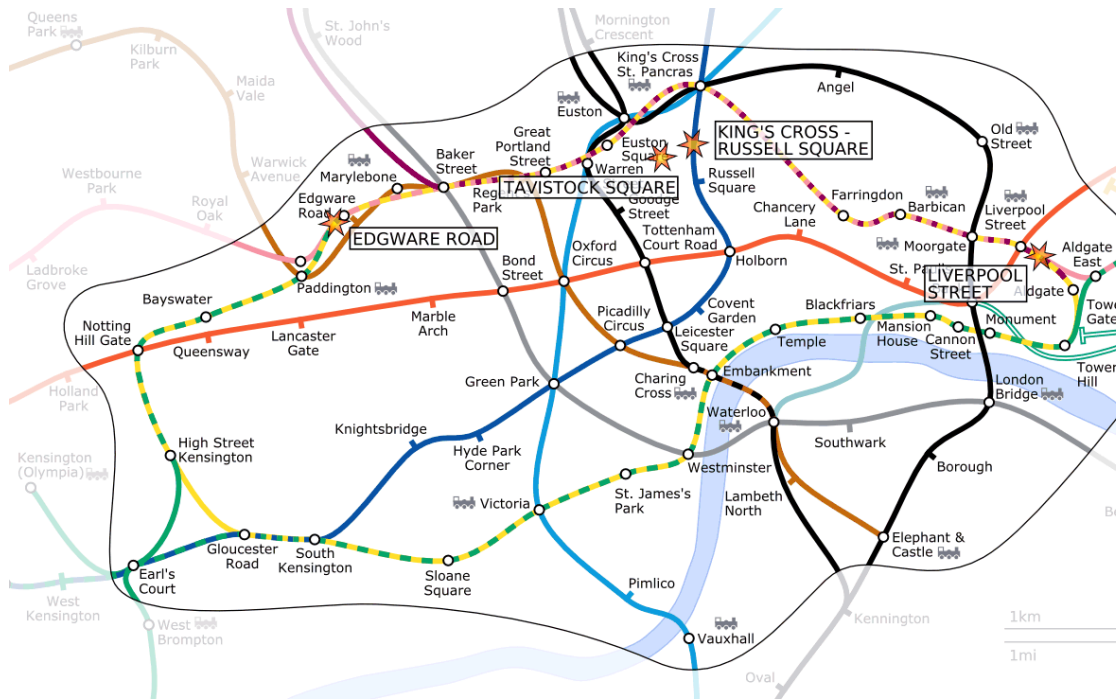


Figure 2. The sites of the explosions [8]

4. The English emergency communication system

Before analysing the events further, I will briefly summarize the specific information.

Many people think that emergency communication refers to communication between organizations involved in rescue operations during an emergency, but this is fundamentally incorrect; it is only part of the complex concept described above.

4.1 English classification of emergency communications

In the English system, emergency communications are structured as follows:

- communication between organizations involved in the rescue,
- exchange of information between injured persons, members of the public present at the scene of the disaster, and any coordinating or emergency response organization,

- communication between emergency services and a coordinating body,
- and finally, for ordinary people, information broadcast through the media.

In communication, on this basis, the following groups are classified:

- Organizations participating in the rescue:
 - London Ambulance Service
 - London Fire Brigade
 - Police (Metropolitan Police Service, City of London Police, British Transport Police)
 - Transport companies and their emergency services (London Underground's Network Control Centre, Transport for London, London Underground Emergency Response Unit)
- Organizations coordinating rescue operations
 - Headquarters of organizations participating in the emergency response
 - A superior group that brings them together, to which the organizations concerned delegate members (Gold Coordinating Group)
- Persons directly affected by the emergency
 - Injured
 - They are not physically injured (emotional injury is possible)
- Media
 - Official announcements
 - On-site reports

4.2 Major incident and command structure

A significant incident is any emergency situation that requires the intervention of one or more emergency services and directly or indirectly affects a large number of people. [9]

In the event of major incidents, the command structure is three-tiered. [9][10] Gold (Strategic) commanders work in a well-equipped office away from the scene and are made up of the senior leaders of the various organizations involved in the emergency response. Silver (Tactical) commanders work on site in a command center and are made up of senior officers present at the scene. Finally, Bronze (Operational) commanders work on site and directly control the use of their organization's resources.

Any emergency service can declare a major incident. If one service declares a major incident, the other services must automatically respond accordingly.

5. The first hour

In the following, I will rely on the report published by the London Assembly [11], referred to in short as the report, and will only indicate references that differ from it. In several cases, I will also include eyewitness accounts. These are not word-by-word citations but rather reflection of the emotions of eyewitnesses.

5.1 In general

Between 8:50 and 9:15, the overall picture was inevitably chaotic. Several, often contradictory, reports and news stories appeared. Numerous emergency calls (999) reported smoke coming from the underground. The London Underground's Network Control Centre's initial observation – a loss of power combined with a huge bang – led to the conclusion that an electrical surge had caused an explosion.

It was only at 9:15 that it became clear that explosions had occurred, but their exact location was unknown. The London Ambulance Service was called to seven different locations. This is why Sir Ian Blair, head of the Metropolitan Police Service, reported six explosions (including the bus bombing) at the first press conference.

In major emergencies, emergency services receive a significant number of emergency calls, which are then cross-referenced to determine exactly what has happened. As the first three explosions occurred underground, the number of calls was relatively low, making it difficult to ascertain what had actually happened.

In this regard, the report states that underground communication was not possible at all, although the problem of underground communication for emergency services is not new. Seventeen years before the bombings, an investigation following a fire at King's Cross station also raised the issue of the lack of underground communication. [12]

5.2 Aldgate tube station

Michael survivor:

„I saw an orange flash, followed by silver flashes, which I think were flying glass shards. This was followed by a growing sound. I didn't hear a bang, just a loud noise. The explosion spun me around and threw me to the ground. Halfway through the fall, it occurred to me that it was a bomb. I thought I was going to die. When I hit the ground, everything was so dark and quiet that I thought I was dead.”

The first emergency call was received by the British Transport Police at 8:51 a.m. from a London Underground employee. The London Fire Brigade was called

to the scene at 8:56 a.m. The first firefighting unit arrived at the station at 9:00 a.m. and requested additional units due to thick smoke billowing from the tunnel. Two additional units and a senior officer then arrived, while another unit was dispatched to Liverpool Street. At 9:05 a.m., the fire department classified the incident as a major incident.

The first British Transport Police officer arrived at the scene at 8:55 a.m. The train's power supply had been cut off. At 9:01 a.m., the officer informed the London Ambulance Service (hereinafter referred to as the ambulance service) that 3-4 walking casualties had emerged from the tunnel. By 9:07 a.m., the number of injured had reached 25. At 9:08 a.m., the traffic police also classified the incident as a major incident. At 9:19 a.m., they officially requested assistance from the Metropolitan Police, whose first officer arrived at the scene at 9:20 a.m.

The first ambulance arrived at Liverpool Street at 9:03 a.m., and three minutes later, an emergency planning manager joined the operation. At 9:07 a.m., the manager informed the ambulance center to alert hospitals to be on standby for a major incident, designated a meeting point for a CBRN (Chemical, Biological, Radiation or Nuclear) hazard, and mobilized the emergency vehicles. At 9:14 a.m., the first ambulance arrived at Aldgate station and reported that the incident was an explosion and that there were five fatalities. At 9:24 a.m., 30 additional ambulances were requested to treat the injured.

In summary, the emergency services arrived at the scene quickly and it was soon established that an explosion had happened on the train. The three services independently declared the incident to be major at 9:15 a.m.

5.3 Edgware Road Underground Station

John survivor:

„The train had just left the station when there was a loud bang followed by two smaller ones, then an orange fireball. As the train's windows and doors shattered, I covered my head and eyes with my hands and arms. Shards of glass and pieces of glass rained down on me and the others. The train's sudden stop threw me forward. I thought I was going to die. There were shocking loud cries and screams, while the air was filled with smoke, soot, and the smell of chemicals. Large and small pieces of debris hit and covered me. A book got wedged between my shoulder and a piece of wall. A piece of metal hit my head and caused pain. The window behind me covered me with glass shards and pieces. My eyes were sensitive and dry from the fireball. No matter how much I rubbed them, it only got worse. Tiny pieces of glass pierced my face and head. I couldn't breathe because the dust and smoke were burning my lungs. I buried my head in the crook of my elbow, trying to get air. After that, a deathly silence fell over the train.”

At 8:58 a.m., the first call to the fire department came from nearby Praed Street. The fire department mobilized five units, but the first unit arriving at the scene at 9:04 a.m. turned back because they found nothing at the scene. At 9:07 a.m., another call came in, and four units were sent to the station, only one of which came from Praed Street. The other units were not redirected until 9:37 a.m. The first unit arrived at the scene at 9:18 a.m., and the fire department classified the incident as a major incident at 9:34 a.m.

The first rescue unit arrived at the station at 9:12 a.m., and at 9:14 a.m., the crew reported that there had been an explosion with a maximum of 1,000 casualties.

At 8:58 a.m., the traffic police received a call reporting that a person had been hit by a train and that a train had collided with the tunnel wall. The police were called by the fire department and arrived at the scene at 9:12 a.m. At 9:32 a.m., the police classified the event as a major incident.

In summary, the deployment of emergency services to the scene and the establishment of communication between them was much slower than at the previous site, even though underground workers had called them at 8:59 a.m. and the train was only 50 meters from the platform when the explosion happened. The police only classified the event as a major incident at 9:32 a.m., and the fire department did so two minutes later.

5.4 King's Cross/Russel Square

George survivor:

„The subway started moving. The doors closed and we began to enter the tunnel. This took about 12-15 seconds. ... A deafening bang. "What the hell was that?" I said. For a millisecond, there was a bright orange light in front of me. I was looking at the double doors with my back to the platform-side door. In that millisecond, the bright orange light disappeared. What the hell was that? Of course, I heard many people crying and praying. We now know that 25 people around me died instantly and another 25 were seriously injured. My first reaction—knowing my position in the car and knowing that I was in the first car—was to think, "We collided with a train." My first thought was, "We collided with a train and the driver is dead." I couldn't see anything. It's the meeting of demons; there's black smoke billowing, and I'm struggling to breathe. In those seconds, I thought, 'This is not good. This is not good, because if this is followed by fire or thick smoke, you're not going to get out of here, George. I literally wrote myself down; I felt this was the end. 'You're not getting out of here.' I couldn't see anything. I've never experienced anything like this before. I can't say anything about the other cars, but in the first car you couldn't see anything.”

The explosion completely isolated the train between the two stations. Very few emergency calls were received, as mobile phones did not work underground. No

one on the train was able to communicate with the outside world until they left the carriage and walked down to the station.

The police were first alerted at 8:56 a.m. based on the station's surveillance camera. At 9:15 a.m., the police classified the event as a major incident.

Firefighters received their first call from the station at 9:02 a.m. The call reported smoke billowing from the tunnel. Three fire engines were sent to Euston Square and one to King's Cross. The first fire engine arrived at the station at 9:13 a.m. At 9:19 a.m. and 9:36 a.m., additional fire engines were requested at the scene. There is no information on whether these requested vehicles arrived or not.

The ambulance service received the first emergency call at 9:04 a.m. The rapid response unit arrived at the scene at 9:14 a.m., followed by the first ambulance at 9:19 a.m. At 9:21 a.m., the ambulance service classified the event as a major incident.

It is not clear exactly how the fire department was informed of the explosion. All that is known is that the fire department was hampered in its investigation of the events by the fact that handheld radios did not work between the platform and the top of the escalator, or between the top of the escalator and the area outside the station. For this reason, the fire brigade used runners who ran up and down the escalator to pass on information.

The first carriage of the train was facing Russell Square, so the seriously injured could be brought to the surface via Russell Square station as soon as the rescue teams arrived.

The first call to the ambulance service from Russell Square station was received at 9:18 a.m., 25 minutes after the explosion. One of the two train drivers guided the passengers to the station. The control center dispatched a rapid response unit to the scene at 9:24 a.m., which arrived at the station at 9:30 a.m. The incident was classified as a major incident at 9:38 a.m., 45 minutes after the explosion.

No separate information about the incident could be obtained from the police, as their records listed the two locations as a single incident.

In the absence of firefighters at Russell Square, the London Underground Emergency Response Unit secured the scene and, with the help of the two drivers, evacuated the passengers and transported the seriously injured from the first carriage to safety. The London Underground Emergency Response Unit is a small and little-known unit. Its task is to respond quickly to unexpected events on the Tube (suicides, derailments, and passenger emergencies). On July 7, the unit was present at all locations and played a significant role in averting danger. The unit has all the equipment and specialists necessary to rescue people and dismantle trains. The investigating committee was surprised to find that the unit does not have blue lights, is not authorized to use bus lanes, and has to pay road tolls for its vehicles.

In summary, the deployment of emergency services to the scene and the establishment of communication between them was chaotic, as the site of the explosion was one of the deepest points of the underground and the train was located almost halfway between the two stations.

5.5 Travistock Square

M survivor:

„We had just left Tavistock Square when there was a very loud noise. It wasn't a bang, it was more like a dull whistling sound, even though the bus was packed and I was at the front. As I was in a kind of shelter, I didn't hear it – I saw it, but I didn't actually hear it very loudly. Everyone fled from the bus as things fell to the floor and small pieces flew everywhere. The only thing I remember is the carnage and everything hitting the floor. I remember looking at the bus and initially thinking, "What is this sightseeing bus doing here?", because that's what it looked like. From the front, it didn't look like a London bus. Now I know why, but at the time I didn't realize it. It looked like the top had been removed. Until I saw the blood and smelled that smell, I thought it was really bad. What I'm saying sounds absurd, but it was so surreal that I can't express myself properly. I see things in my head, but I can't express them in words.”

At Travistock Square, it was immediately obvious what had happened. The first emergency calls came in at 9:47 a.m., one minute after the explosion. By 9:56 a.m., twelve calls had been received. By then, the first medics were already on the scene, as the bus had exploded in the immediate vicinity of the British Medical Association headquarters and doctors and other trained first responders had rushed out immediately.

A member of the police force was also at the scene by this time. The first firefighter arrived at 9:50 a.m. and the first ambulance arrived at 9:57 a.m. The records do not indicate when the three organizations declared the incident as a major incident.

5.6 Summary of the report for the four locations

The 'first alert' system describes how communication between the control rooms of the emergency services takes place in the event of a major incident. The 'first alert' call is a conference call involving the emergency and transport organizations. The 'first alert' system was activated at 9.12 a.m. and the first conference call took place at 9.25 a.m. Based on the evidence, the investigation concluded that the 'first alert' system needs to be further improved, as, for example, the police did not officially receive a call to the Aldgate station until 9.19 a.m., 7 minutes after the 'first alert' system was activated, or because the

significant incident at Edgware Road was not identified before the conference call took place.

6. Communication problems

The Gold Command Group was originally convened at New Scotland Yard and held its first meeting at 10:30 a.m., at which it was decided to relocate the group to Hendon. The new location had been used before in similar cases and was well equipped, but it had one significant disadvantage: it was far from central London, where the headquarters of the emergency services are located.

6.1 Use of mobile and landline phones

The incident, by its very nature, caused significant problems in communication between emergency services. Throughout the morning and early afternoon, people continuously tried to call their friends and family members. The London telephone network handled an unprecedented volume of traffic. The number of calls on the Vodafone network increased to 250% of normal, while text messages doubled. British Telecom's traffic doubled. The number of wired and wireless calls to the Vodafone and O2 networks increased tenfold – 300,000 calls every 15 minutes, compared to 30,000 on a normal working day. O2 normally handles 7 million calls, but on July 7, it had to connect 11 million calls which represents a 60% increase.

Firefighters used mobile phones to stay in contact with their headquarters, which often caused problems. The police's TETRA radio system worked well as a backup system, but only the British Transport Police had such devices.

The ambulance service also primarily used mobile phones to communicate with the control centre. In reality, official vehicles are also equipped with radios, but problems arose with their use, as will be discussed later. The system was scrapped as outdated. Today, the ambulance service uses personal pagers as a backup system.

There is a system that allows only emergency services to use the mobile phone network within a specific area in the event of an emergency. This system is called Access Overload Control (ACCOLC).[13][14] The essence of ACCOLC is that mobile phone SIM cards contain a number in the range of 0-15. For ordinary users, this number is in the range 0-9, while for higher priority users, such as emergency services, this number is in the range of 10-15. In an emergency, mobile phones with SIM cards containing numbers between 0 and 9 receive a "service unavailable" signal, and only higher-priority devices can make calls within that cell. If the system is still overloaded, the operator can further increase the priority

level (11, 12, etc.). It has to be noted that ACCOLC was replaced by MTPAS (Mobile Telecommunication Privileged Access Scheme) in 2009. [15]

The ambulance service requested the introduction of ACCOLC in the Aldgate station area because they had ongoing communication problems. However, the Gold Coordinating Group did not approve the introduction of ACCOLC because they feared that it would cause panic among people in the cell and because it was unclear whether authorized persons had ACCOLC-enabled mobile phones.

Despite this, the City of London Police activated the ACCOLC system on the O2 network in a 1 km radius around Aldgate station between 12 noon and 4.45 p.m. During this period, O2 estimated that "hundreds of thousands, possibly over a million calls" were lost.

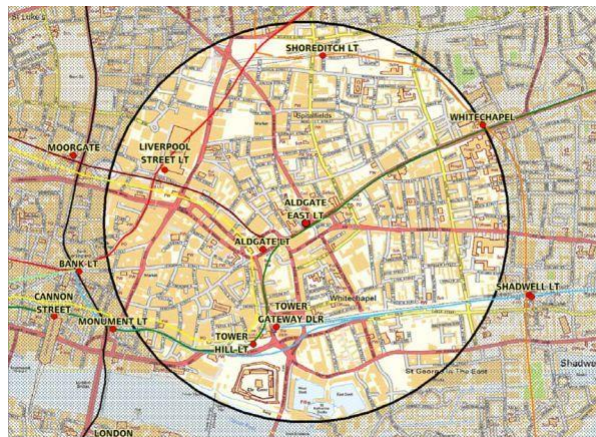


Figure 3. The area affected by ACCOLC

The report concludes that, based on the actual command and control structure, only the Gold Coordinating Group had the authority to order ACCOLC, and therefore the City of London Police would not have had the authority to implement it.

6.2 Communication between the Ambulance Service

The report concludes that the ambulance service personnel did everything possible under the extraordinary circumstances. All four sites were cleared within three

hours. During this time, approximately 200 vehicles and 400 employees and managers worked at the sites and 404 injured people were transported to hospital. The fact that the explosions occurred at four different points, three of which were underground, made it extremely complex and difficult to organise and implement the service's response.

The ambulance service used two separate radio systems. One was based on UHF radios and was used by control personnel to communicate with the scene, while the other was a VHF system used by emergency vehicles and key managers. The UHF communication system, which should have been used due to the unavailability of the mobile phone network, did not work. This was due to the simple fact that there were not enough devices.

The use of the VHF system was also disrupted:

- a. Although two channels were used, route selection was carried out by a single operator.
- b. The managers on site did not know which channel to use, as they normally receive the necessary instructions via mobile phone, but in this case the mobile system was not working.
- c. The five different locations generated a very high volume of traffic, which the two channels were unable to cover.

These problems meant that personnel at the sites were often unable to communicate with headquarters. This resulted in situations where additional ambulances and equipment requested did not arrive at the scene, they were unable to contact other locations, and they were unable to receive information about which hospital to transport the injured to.

In the event of disasters and major incidents, one of the most important task is to ensure that there are enough hospital beds for the injured. The NHS (National Health Service) made 1,200 beds available within three hours. However, it is possible that alerting several hospitals located close to the scene but not equipped for acute care could have improved the standard of care. For example, Great Ormond Street Hospital was not alerted, even though it was closest to Russell Square station. Fortunately, the hospital staff still played a key role in the rescue efforts by setting up a mobile hospital. In the absence of adequate communication tools, medical students acted as couriers, carrying information back and forth.

6.3 Communication with persons involved in the incident

In such situations, with darkness and smoke, one of the most important considerations for passengers is to provide information as soon as possible. However, the drivers could only communicate with passengers in the first carriage, as most trains did not have internal communication devices that would

have allowed passengers and drivers to communicate, or if they did, they were damaged in the explosion. Furthermore, the explosions occurred in the second carriage, so the rear carriages were physically inaccessible to them.

In such situations, with darkness and smoke, one of the most important priorities for passengers is to provide information as soon as possible. However, the drivers could only communicate with passengers in the first carriage, as most trains did not have internal communication devices that would have allowed passengers and drivers to communicate, or if they did, they were damaged in the explosion. Furthermore, the explosions occurred in the second carriage, so the rear carriages were physically unavailable to them.

The report highlights the following shortcomings:

- a. There are no emergency lights in the tunnels.
- b. Lack of first aid kits in carriages and stations.
- c. Lack of clearly visible safety instructions in carriages.

6.4 Recording details of injured and uninjured persons for subsequent communication purposes

In the event of a major incident, one important task is to record the details of those who are physically uninjured and those who are ambulatory and have already been treated, partly for the purposes of any subsequent psychiatric treatment and care, and partly to inform friends and relatives who may be looking for them. It is the responsibility of the fire brigade to transport injured and uninjured persons to a safe place. It is the responsibility of the police to record the personal details of injured persons after they have been treated and of uninjured persons at the scene. Overall, the tasks of the police are as follows:

- a. providing information about what happened
- b. advice on what to do
- c. assistance in contacting loved ones
- d. psychological assistance, if necessary
- e. assistance and advice on getting home safely
- f. information on where to seek help in the future
- g. recording of personal data.

According to the report, the police were only able to partially meet the above requirements. For example, the first uninjured passengers left the scene immediately, and later several passengers reported that no one had attended to them. Furthermore, the London Emergency Services Procedures Manual does not specify who is responsible for setting up a reception area, and London Underground does not have information on which areas are designated for receiving passengers during the evacuation of individual stations.

A total of around 4,000 people were affected by the explosions. However, the police only have details of 946 people, meaning that more than three quarters of those affected are unknown

6.5 Communication to the public

During the first hour, the media received only the following official information: “go in, stay in, tune in” – loosely translated as “go home, stay at home and listen to the news”. Sir Ian Blair did not hold the first press conference until 11.15 a.m., and until then only the above message was in effect.

At 9:30 a.m., a decision was made to set up an emergency hotline, and as a result, an 0870 number began operating at 1:30 p.m. Unfortunately, an incorrect connection delayed its effective operation until 4:00 p.m. In such cases, the line should be free of charge, but this number was put into operation with a charge of 10 pence per minute. The line handled 42,000 calls in the first hour. It was later decided that the income from this line would be used for charitable purposes.

In such situations, it is very important to take care of children of nursery and school age. However, schools did not receive any information about what to do in this case. Some schools decided to close and send the children home, saying that they would be safer there. There were schools that chose to extend their opening hours, as they thought that without transport, parents might not be able to pick up their children. At its first meeting at 10.30 a.m., the Gold Coordinating Group decided to advise schools to provide supervision for children until their parents could collect them. However, this recommendation only reached local schools at 1 p.m., which in many cases was too late.

Another important piece of information concerns the situation regarding public transport. On the afternoon of 7 July, several conflicting messages were released. On the one hand, the media continuously broadcast the already mentioned “go in, stay in, tune in” message, while on the other hand, the mayor stated that everything should return to normal as soon as possible.

At 10 a.m., the transport authority decided to suspend services passing through the city centre. This decision was made partly for safety reasons, as the police could not guarantee that there would be no further attacks, and partly because the road closures made it impossible to implement diversions. Bus services restarted on most routes by 5 p.m.

As a result of these events, traffic on other communication channels also skyrocketed. Visits to the official websites of emergency and transport services also increased significantly. The Transport for London website received more than 600,000 visits that day, six times its usual traffic. The company sent out more than 600,000 emails between 3 and 5 p.m. on 7 July to those who were registered in its email alert system, and more than half of these emails were read within an hour.

The police updated their website 27 times and had 1.5 million visitors during the day.

6.6 Following up and communication

Following the terrorist attack, the Resilience Mortuary was established as an independent organisational unit to identify the victims. It began operating at the Honourable Artillery Company in the City of Westminster (an inner city district of London). By January 2006, the operating costs of this organisation had reached £3 million. This was the first time such an organisation had been set up. The organisation began operating at 10 p.m. on 8 July, and within seven days, all of the deceased had been identified.

Those searching for their loved ones first had to go to the Casualty Bureau to officially report someone missing. To facilitate this work, the police set up a centre within the aforementioned office. The centre was named the Family Assistance Centre, which later caused several problems, as it was responsible for maintaining contact with all persons involved in the event, and several survivors concluded from the name that its only function was to search for loved ones.

The report highlights the need for post-traumatic stress treatment for both survivors and their family members. To this purpose, it would be essential to collect data on all those who may be affected. In this regard, it proposes the creation of a website where the above-mentioned persons can register and thus access treatment.

7. Summary and recommendations

In view of these tragic events, it has become clear which shortcomings need to be remedied as soon as possible.

7.1 Communication between the underground and the emergency services

O2 won the tender for the development of emergency service communications with its TETRA-based solution called Airwave.[16][17] The cost of developing Airwave was £2.9 billion, and it achieved 95% coverage in 2005. In December 2006, O2 sold the system to Guardian Digital Communications for £2 billion.

Back in 1999, an agreement was signed to build a network providing wireless communication (mobile, internet) throughout the entire underground system by 2010. The system, named CONNECT Project, also offers a TETRA-based

solution. The design, construction and maintenance costs will reach £2 billion over a 20-year period. The system will be able to serve both mobile phones and the Airwave system. The report specifically mentions accelerating the rollout of this system, with a deadline of the end of 2007. The system finally fully operates from November 2008. [18]

A report published by Transport for London in 2018 states that a new, more modern system could be installed to replace the London Underground's outdated TETRA system by mid-2030 at the earliest. Several refurbishment projects will need to be carried out to keep the Connect system stable and secure until mid-2030. These projects will involve upgrading the current hardware and software components. [19]

The report also states that the three data networks currently in operation must be replaced with a new data network called FON (Future Operational Network). This must be designed in such a way that it can safely serve the various operating services alongside the currently operating TETRA system. The introduction of FON requires capital investment that will enable its deployment within 2.5 years

7.2 Other recommendations

The communication shortcomings mentioned earlier — e.g. reviewing the privileges of the London Underground Emergency Response Unit, how to declare a major incident and activate ACCOLC, closer cooperation with the media, recording the details of those involved, etc. — necessitate a review of procedural protocols. The report contains a total of 54 recommendations for remedying minor and major errors in the future.

References

- [1] Five get life over UK bomb plot. *BBC News* (2013, January 13)

http://news.bbc.co.uk/2/hi/uk_news/6195914.stm

(Date Accessed: 03 October 2025)

- [2] Dad's bomb plot anger, *Manchester Evening News* (2013, January 13)

<https://www.manchestereveningnews.co.uk/news/greater-manchester-news/dads-bomb-plot-anger-991158>

(Date Accessed: 03 October 2025)

- [3] Five found guilty of UK bomb plot. *Wikinews* (2007, May 1)

https://en.wikinews.org/wiki/Five_found_guilty_of_UK_bomb_plot

(Date Accessed: 03 October 2025)

- [4] Blair rejects 7/7 inquiry calls. *BBC News* (2007, May 02)

http://news.bbc.co.uk/2/hi/uk_news/6615387.stm

(Date Accessed: 03 October 2025)

- [5] Links between the 7 July bombers and the fertiliser plotters. *MI5 – Security Service* (2007)

<http://www.mi5.gov.uk/print/Page384.html>

(Date Accessed: 14 June 2007)

- [6] Jihadi diary: Inside the mind. *BBC News* (2007, June 14)

http://news.bbc.co.uk/2/hi/uk_news/magazine/6750911.stm

(Date Accessed: 03 October 2025)

- [7] Report of the Official Account of the Bombings in London on 7th July 2005. *House of Commons* (2006, May 11)

<https://www.gov.uk/government/publications/report-of-the-official-account-of-the-bombings-in-london-on-7th-july-2005>

(Date Accessed: 03 October 2025)

- [8]

http://en.wikipedia.org/wiki/Image:7_July_London_bombings_locations.png

(Date Accessed: 03 October 2025)

- [9] Major Incident Principles. *London Emergency Services Liaison Panel (LESLP)* (December 2021)

https://www.london.gov.uk/sites/default/files/leslp_mip_v11.5_dec_2021_-_public.pdf

(Date Accessed: 03 October 2025)

- [10] Gold Silver Bronze command structure, *Wikipedia*

http://en.wikipedia.org/wiki/Gold_Silver_Bronze_command_structure

(Date Accessed: 03 October 2025)

- [11] Report of the 7 July Review Committee. *London Assembly* (2006, June)

<https://www.london.gov.uk/media/66581/download>

(Date Accessed: 03 October 2025)

- [12] Desmond Fennel: Investigation into the King's Cross Underground Fire. *Parliament by the Secretary of State for Transport by Command of Her Majesty* (1988, November)

https://www.railwaysarchive.co.uk/documents/DoT_KX1987.pdf

(Date Accessed: 03 October 2025)

- [13] Harvey Fawcett: Communicating in a Crisis – What Really Works, *Siemens Insight Consulting*

[http://www.insight.co.uk/files/whitepapers/Communicating_in_a_crisis\(White_paper\).pdf](http://www.insight.co.uk/files/whitepapers/Communicating_in_a_crisis(White_paper).pdf)

(Date Accessed: 20 April 2007)

- [14] ACCOLC, *Wikipedia*

<http://en.wikipedia.org/wiki/ACCOLC>

(Date Accessed: 20 April 2007)

- [15] MTPAS, *Wikipedia*

<https://en.wikipedia.org/wiki/MTPAS>

(Date Accessed: 20 April 2007)

- [16] Fred Micklewright: O₂ Airwave Service, *GOSE Seminar*, (2007, March 29)

<http://www.gose.gov.uk/497648/docs/264757/airwaveResilience.pdf>

(Date Accessed: 19 April 2007)

- [17] Trevor Winterbottom: SE Telecommunications, Resilience Seminar Airwave Overview,

<http://www.gos.gov.uk/497648/docs/264757/airwaveInteroperability.ppt>

(Date Accessed: 20 April 2007)

- [18] Connect Project, *Wikipedia*

https://en.wikipedia.org/wiki/Transport_for_London#Connect_project

(Date Accessed: 03 October 2025)

- [19] Future Operational Network - TfL

<https://board.tfl.gov.uk/documents/s19640/fc-20230308-item12a-FON-part1.pdf>

(Date Accessed: 03 October 2025)

Designing a physiological research laboratory and developing its control program at the University of Manchester

Zoltán Géza Tóth

Obuda University Kandó Kálmán Faculty of Electrical Engineering

Institute of Electronics and Communication Systems

Department of Telecommunication

1084, Budapest

Tavaszmező utca 15-17.

toth.zoltan@kvk.uni-obuda.hu

Summary – In this document, I will describe the design of the physiology laboratory I have planned at the University of Manchester. To this end, I will briefly review the physiological background related to the task, then present the implementation of the laboratory designed on this basis. During my presentation, I will focus on the MATLAB application I developed, which controls the measuring instruments and records the measured data.

1 Introduction

Some functional brain imaging techniques are based on the observation that there is a close relationship between neural activity in the brain and vascular responses, such as increased blood flow and oxygenation. The task of basic physiological research today is to bring researchers closer to understanding this process and thereby facilitate a more thorough investigation of the functioning of the human brain.

My research combines multi-wavelength optical imaging and electrophysiological data recording, which is expected to reveal the relationship between spectral components and the recorded electrode signal.

By illuminating the tissue with narrow-bandwidth light, even very small changes in the surface of the brain can be detected with a high-resolution monochrome camera, enabling the examination of brain activity. The sources of these optical

signals are blood volume, oxyhaemoglobin and deoxyhaemoglobin concentration, and tissue scattering.

The first step in my research was to design a laboratory suitable for studying the neural processes outlined above.

2 Physiological basics

A basic prerequisite of any engineering work is that the designer must be familiar, even if only partially, with the scientific knowledge without which the set goal, in this case the design of the laboratory, cannot be achieved. Thus, in the first chapter, I will briefly and simply summarise the relevant physiological knowledge.

2.1 Electrical activity of nerve cells, encoding of information

Living creatures are unique in that they use receptors to recognise their environment. These receptors produce chemical substances in response to mechanical stimuli. When these chemical products reach the nerve cells, they activate ion pumps located in the cell wall, which specifically pump potassium, sodium, calcium, and/or chlorine ions through the cell membrane [1]. The resulting potential difference was first measured by [2]. Figure 1 shows that the potential difference rises steeply from a resting potential of -40 – 50 mV to an action potential of $+40$ mV. This is followed by a rapid hyperpolarization phase, during which the potential drops to a value 20 – 30 mV below the resting potential. During this hyperpolarization phase, the nerve cell cannot be stimulated.

The potential change that occurs when a nerve cell is stimulated is referred to as an action potential in the literature. The amplitude of the action potential depends only on the type of nerve cell and is not influenced by the strength of the stimulus. This raises the question of how the degree of sensation is encoded in the nervous system. From an engineering perspective, the answer is simple. If we assign a binary value of 1 to the action potential and 0 to the resting potential, we already have a coding algorithm. Of course, it is not that simple, as the same stimulus will not produce the same code every time. The simplest way to describe neural coding is by the frequency of successive action potentials. A nerve cell responds to the same stimulus with a statistically well-described frequency of action potentials. [3]

Of course, it is never a single nerve cell is stimulated, but rather a group of nerve cells innervating the same area that collectively transmits the information. Accordingly, multiple nerve cells are stimulated in the brain. An electrode placed in the space between brain nerve cells can record the potential change created

jointly by several nerve cells, which appears in the form of spikes with different peak values. Figure 2 shows a detail extracted from an electrode signal I recorded, showing spike trains from different nerve cells (signals of nearly identical amplitude originate from the same cell).

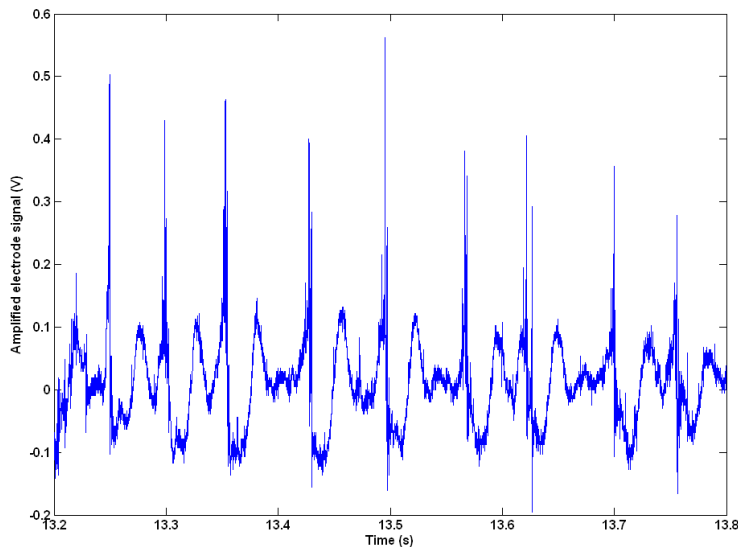


Figure 1. Electrode signal. A series of consecutive spikes. The signal, which shows the potential change generated jointly by several nerve cells (spikes with different peak values), was recorded with an electrode placed in the intercellular space.

The signal transmitted by peripheral nerve cells reaches the cerebral cortex through the neural pathway. In the brain cortical nerve cells process the information and then send response signals to the periphery. This processing is a very energy- demanding process. The weight of a human brain operates in an ‘oxygen cloud’ and the incomplete combustion that occurs in muscles under high stress is not permitted here. This is also shown by the following data. The weight of a human brain is about 2% of ourthe body weight, but its oxygen consumption is 20% and its glucose (energy) consumption is 25%, which can increase several times over during intense mental activity, such as learning. This results that the blood and oxygen supply increases in the active areas. The question is, how can this higher signal level be detected? I will review this in the next section.

2.2 Brain imaging techniques

People have always been interested in how the living brain works. The problem is that our brain is inaccessible, as nature has understandably placed it in a well-protected hard shell (the skull). The electroencephalograph (EEG), invented in the

first quarter of the twentieth century, was the first device that could be used to examine the brain from the outside. The EEG has very good temporal resolution, but it cannot precisely determine which area of the brain the signal is being received from.

The next imaging tool was the positron emission tomography (PET) scanner, which was introduced in the 1970s. Finally, magnetic resonance imaging (MRI) appeared in the 1980s. Figure 2.a) shows an MR image taken by a 3T MR machine at the University of Manchester. Both methods (PET and MRI) measure haemodynamic changes in the brain rather than neural activity directly. The two techniques have a spatial resolution of around 1 mm, but their temporal resolution is only in the range of seconds. Another problem arises in relation to their application, as these two methods cannot be used to determine the nature of the neural function associated with the detected haemodynamic change, e.g. the activity of a given brain area may result in an inhibitory or excitatory neural response.

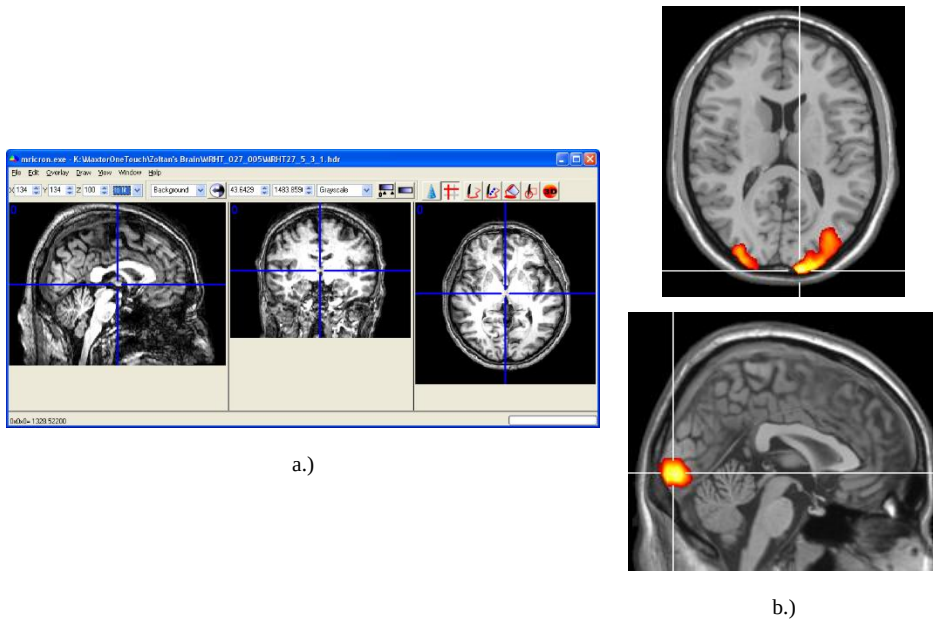


Figure 2. MRI and fMRI

Figure a) shows an MR image. Figure b) clearly shows the areas activated by the fMRI technique.

In modern brain research to map brain functions, functional magnetic resonance imaging (fMRI) based on MR is most commonly used. The essence of this technique is to compare an MR image of the patient's brain at rest with an MR image recorded during a well-defined activity (e.g., tracking moving signals with the eyes). The difference signal is then projected onto the image of the brain, see figure 2. b.).

The methods described in the previous paragraphs have insufficient temporal or spatial resolution to answer the question of what relationship exists between neural activity in the brain and the haemodynamic response. One possible way to answer this question is to observe the brain directly using optical imaging while measuring neural activity with electrodes.

2.3. Partial direct optical examination of the brain surface

The skulls of some small rodents are thin and translucent enough to allow images of the brain surface to be recorded through them in living subjects. Four physiological characteristics influence the amount of reflected monochrome light that is recorded. [4] The four components shown in Figure 3 are:

1. Haemoglobin saturation. This factor comes from the colour difference between oxygen-saturated arterial blood (oxyhaemoglobin) and venous blood (deoxyhaemoglobin).
2. Blood Volume. The blood vessels in the activated areas of the brain dilate, causing a decrease in the amount of reflected light.
3. Tissue Scattering. The shape of excited nerve cells changes due to the inflow and outflow of ions, which modifies the amount of light absorbed.
4. The amount of a special chemical substance (cytochrome oxidase) present in nerve cells also influences the degree of light reflection. The role of cytochrome oxidase is currently unknown.
5. Water content, which is not shown in the figure, only causes changes in the infrared light range. [5]

The combined change in light absorption of the factors listed above results in a change in the amount of light reflected and thus recorded. Hillman presents the change in light absorption of these components as a function of the wavelength of the illuminating light in his summary article. [5] With this data, it is possible to select the required wavelength of the illuminating light.

Since four main components cause the change, in practice it is standard to use at least four different wavelengths of light at approximately the same time. Hillman outlines a measurement setup in which white light is passed through filters arranged on a wheel. By rotating the wheel, light sources of different wavelengths can be produced. The problem is that the filter wheel must be synchronized with the camera, i.e., the rotation of the wheel must be synchronized with the camera's exposure time. [5]

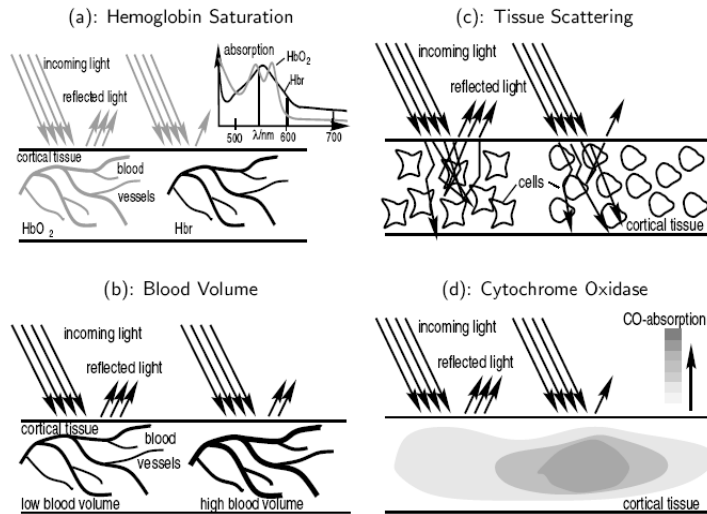
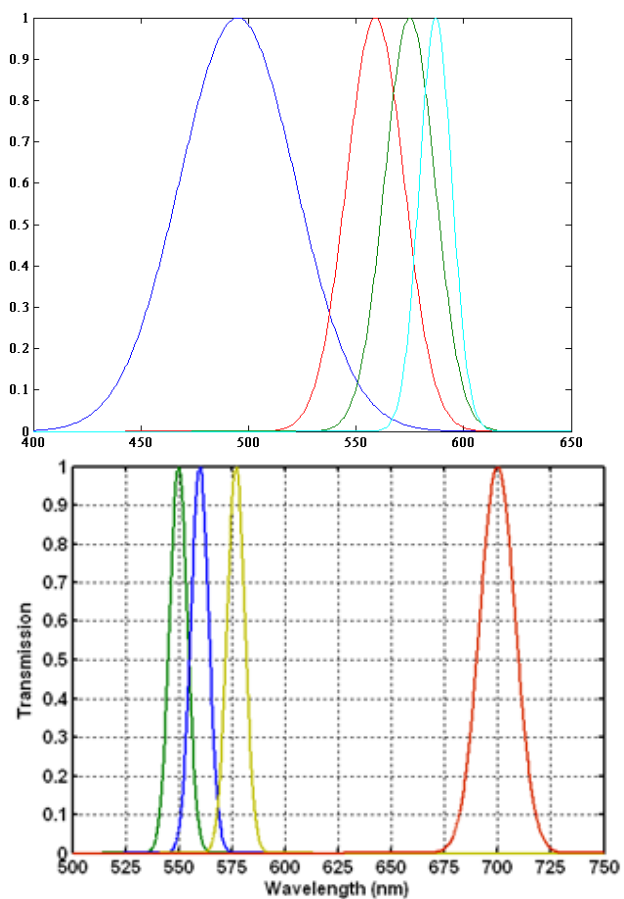


Figure 3. Four factors influencing the amount of light reflected from the surface of the brain. [6]

The filters used must be sufficiently narrowband so that the spectral signals received do not overlap. In practice, the centre frequency of the filters is usually selected according to the following criteria:

1. Isobetic points, where the graphs of the oxy- and deoxyhaemoglobin components intersect. When using illumination light with a wavelength corresponding to the isobetic point, the recorded signal essentially depends only on changes in blood volume. Examples of such light are light with wavelengths of 520, 530 and 570 nm.
2. The points where the ratio of oxyhaemoglobin and deoxyhaemoglobin components are highest. For example, at 560 nm, the deoxyhaemoglobin component is dominant, while at 577 nm, the oxyhaemoglobin component is dominant.
3. At near-infrared frequencies, tissue scattering becomes dominant (700-750 nm).

Figure 4a) illustrates the problem of overlap mentioned above. The distance (FWHM) between the -6 dB points of the three filters (between 550 and 600 nm) used by Berwick et al. [7] is ± 16 nm, ± 14 nm and ± 9 nm, so even though the centre frequencies were well chosen, the resulting signals overlap significantly. The ± 5 nm FWHM of the filters I used allows for a significant reduction in this overlap (Figure 4 b).



a.)

b.)

Figure 4 Characteristics of filters used.

a.) Characteristics of filters used by Berwick et al. [7]. b.) Characteristics of filters used by me.

The horizontal axis shows the wavelength of transmitted light, while the vertical axis shows the normalised intensity of filtered light.

2.4 Choosing an animal model

Laboratory rats are commonly used as subjects in similar experiments, as the whisker system of these animals is a very good model. The whisker system is matrix-shaped, with rows (A-E) and columns (1-7). [1] This whisker matrix corresponds to a distinct region of the brain (barrel cortex), the structure of which is shown in Figure 5.

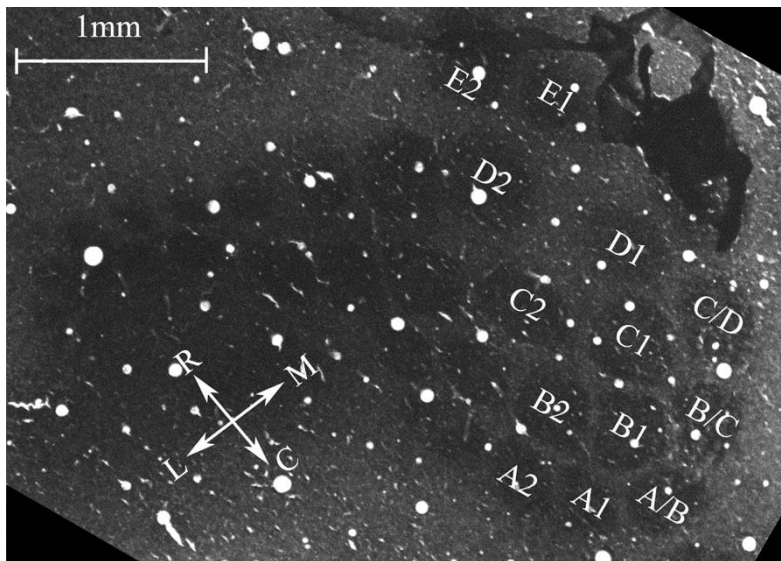


Figure 5. The barrel cortex, stained section.

An additional advantage of using this model is that its operation has already been well characterized in electrophysiological experiments. In their summary paper, Kleinfeld et al. found that there is a logarithmic relationship between the frequency of mechanical stimulation of the moustache (fing) and the spike frequency (fspike) in the corresponding barrel cortex area, which can be described by the following simple equation: $\text{fspike} = 2 \ln(\text{fing}) + c$, where c is a constant. [8]

This connection allows us to look for correlations between the haemodynamic response and the spike frequency.

After reviewing the physiological background and some of the technical issues involved, I will discuss the design and construction of the laboratory.

3 The structure of the laboratory

During the design process, I had to take the following aspects into consideration:

- Detection of three or four different components
- Resolution of approximately 10 μm
- Computer-controlled stimulation
- Computerized data recording
- Stable power supply for life support devices
- High-precision power supply for illumination
- High-speed filter changer
- High-speed computer
- High-speed, high-capacity storage
- Operation under MATLAB
- Filtering of electrical interference signals
- Elimination of mechanical vibrations

The logical diagram shown in Figure 6 was developed taking the above points into consideration. The computer used in the design runs on the fastest processor available at the time of the design (2 Pentium®4 3.20GHz CPUs) and has 2 GB of memory. The write speed achieved by connecting the two 500 GB hard drives in RAID 0 allows image recording throughout the entire duration of the experiment series. This is important because, due to slow background storage and MATLAB's 1 GB memory limit, previous series of experiments were unable to receive video signals during the time interval marked in pink in Figure 9.b. [6] The problem was caused by the fact that the speed of saving the digitized image information to the background storage was slower than the speed of receiving it, so the MATLAB program finished saving the data stored in memory during this time interval.

The camera used operates with a 12-bit A/D converter, has a maximum resolution of 1024x1024 pixels, and can take up to 30 images per second. The filter changer can handle four filters, and tests have shown that it can switch from one filter to another at a frame rate of 28 frames per second (4x7) while the camera optics are closed.

The stimulating signal and the camera synchronization signal are provided by two D/A converters (A0 and A1 in the figure). The amplified signals from the electrodes can be received by a 16-channel A/D converter. I used the AI0 A/D converter to record the stimulating signal. This signal will play an important role in data processing, as it can be used to calculate the exact timing.

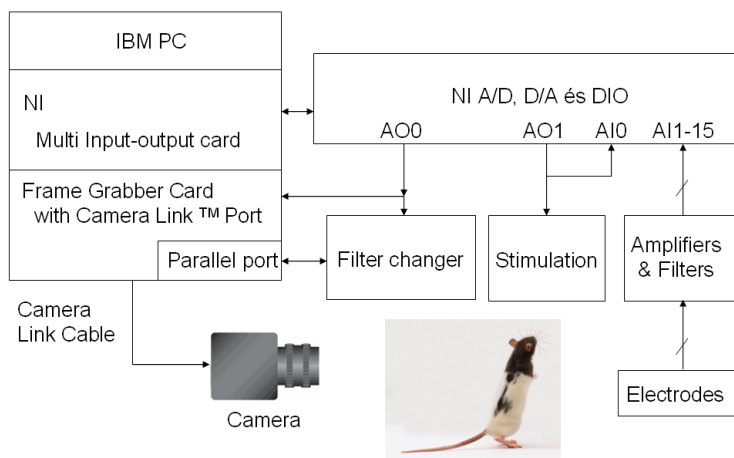
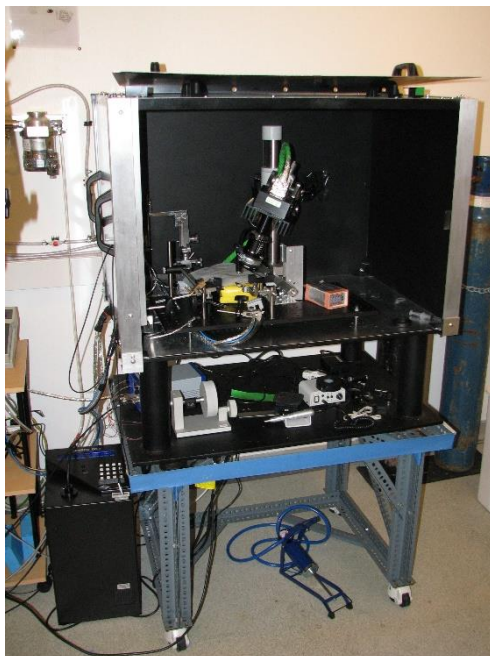


Figure 6. Schematic diagram of the laboratory setup



a.)



b.)

Figure 7. Implementation of the laboratory in practice. The tower on the left side of Figure 7.a houses the UPS, the high-stability DC power supply, the 16-channel high-sensitivity amplifier, the National Instruments A/D, D/A rack, a Neurolog amplifier and filter unit, three oscilloscopes (1 digital storage

and 2 analog), the Humbag (50 Hz adaptive filter), and the counter to measure the heart rate. A mobile microscope can be seen in the foreground of the image, with the life support instruments in the background. The filter changer, which contains the high-intensity xenon lamp and four filters, is located at the bottom right. Figure 7.b shows the lockable box resting on the stand, three sides of which (left, top and front) can be removed. The box is made of aluminum, so it not only blocks out external interfering light, but also acts as a Faraday cage. Four inflatable rubber mounts between the dexion stand and the cast iron support element ensure the filtering of mechanical vibrations (the necessary pump is visible under the stand). The gray/blue box located on the back left of the support element generates the variable DC voltage required for the ceramic vibrating element connected to the whisker. The gray rotating wheel in front of it allows the vertical position of the brain electrode to be controlled with micron precision without having to open the aluminum box. The high-resolution monochrome camera is located inside the aluminum box. An extra heat sink is located at the front of the camera, which serves to reduce thermal shot noise. The camera itself is located on a heavy, stable stand. The weight of the stand provides additional protection against mechanical vibrations. The support rail visible under the camera is used to place the electrode holder and positioning head, which is located in the background of the image. In addition to the preamplifier box located on the right edge, additional fastening elements are also visible inside the box. Some of these hold the animal stable, while others hold the whisker stimulation device.

4 The operating software

The measurement control software was developed entirely in MATLAB. Before starting a measurement series, two graphical user interfaces (GUI) can be used to set the parameters of each hardware element.

The first GUI (Figure 8) is used to set the camera parameters. Three drop-down menus allow you to set the camera's frame rate, gain, and binning, which converts multiple pixels into a single pixel. The use of the latter may be necessary in low light conditions, the disadvantage is that it reduces the resolution (with 2x2 binning, the resolution of 1024x1024 pixels deteriorates to 512x512 pixels). Since it is not necessary to save the entire region during the recording of the image (space saving), the program takes advantage of the fact that the camera's control card provides the option to set the Region of Interest (ROI). The ROI can either be selected with the mouse on the image (red rubber box), or it can be set in the left-hand menu with the coordinates, width and height of the upper left point. Since four different filters are used during the measurement, it is advisable to check what images are obtained with the different filters. The currently used filter can be changed using the Filter button. As an additional help, the program displays the maximum brightness pixels with a value of 4096 in blue. The other buttons and the Binning menu can only be accessed using the Stop button, as this requires stopping the camera operation. The Image button saves the current image to a file. The Stable button displays the difference between consecutive images, allowing

you to check the noise level of the image. Finally, the Histogram button draws a histogram of the currently displayed image.

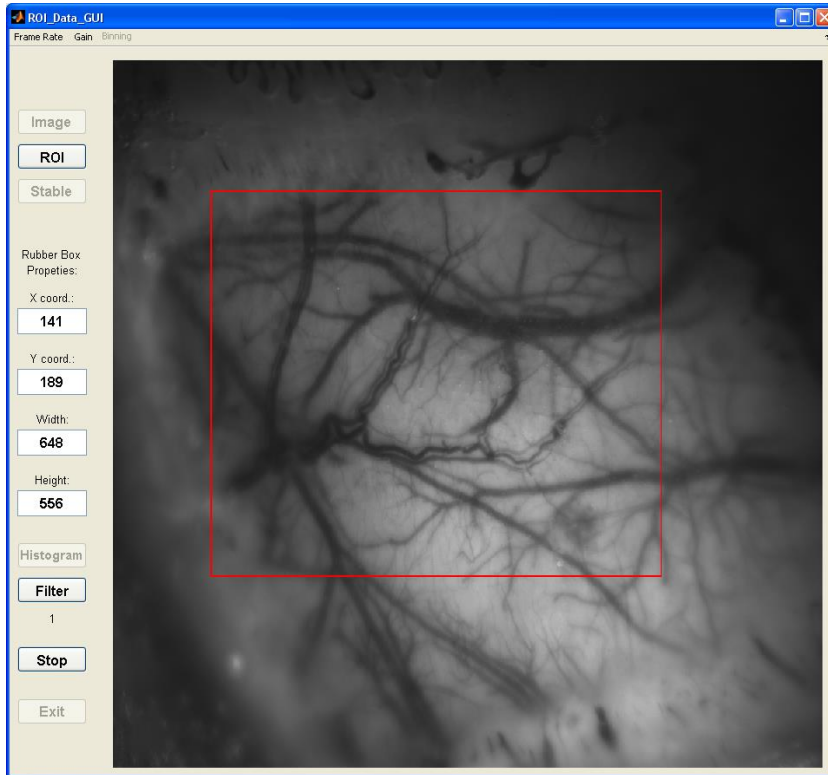


Figure 8. GUI for setting the parameters of the camera.

A series of experiments consists of several consecutive, repeated experiments with the same parameters, called trials (pronounced *trajel*). Figure 9.b shows the timing of a trial. The Delay is usually one or two seconds, and the signal recorded during this time serves as a baseline during data processing. The usual length of the Duration (stimulation) is 2-5 seconds. The Recovery time is usually given so that, on the one hand, the hemodynamic response can return to the initial value during this time, and on the other hand, the total duration of the trial exceeds 10 seconds. This is necessary because a low-frequency (~ 0.1 Hz) oscillation called the V signal occurs in the cerebral blood flow. [9] In the case of trials longer than 10 seconds, the initial phase of this oscillation is different, so that when they are summed, they cancel each other out.

The parameters of the experimental series can be set using the GUI shown in Figure 9.a. These parameters include the trial data described above, as well as the

values of the digitizing devices and the filter changer control. Any data characterizing the experimental series can be entered in the Other Data text box.

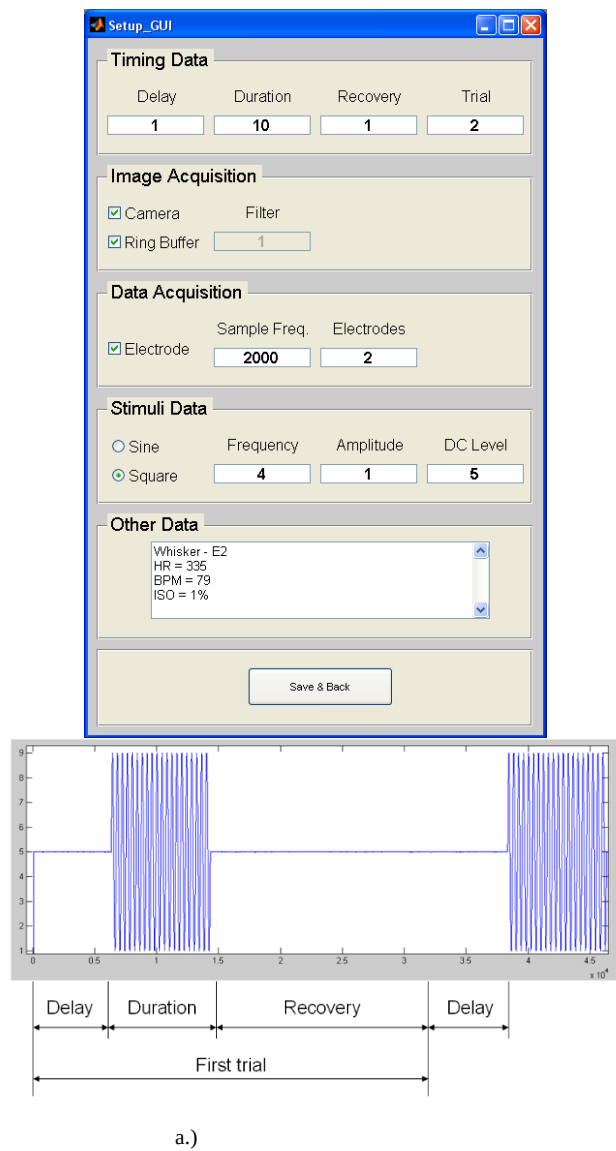


Figure 9. The GUI shown in Figure a. allows to set the parameters of the stimulation, filter changer and D/A, A/D converters. Figure b. shows the parameters that can be set for each trial (an experimental series is made up of several consecutive trials). The pink rectangle shows the time range that could not be recorded during previous measurements.

Summary

Overall, I can say that during my nearly one-year work, I managed to build a laboratory that represented the cutting-edge technology of the time. This is also shown by the fact that the laboratory I designed was also built at the Shanghai University. With the help of the completed and already operational laboratory, I sought answers to the following questions:

- How do the physical parameters of the stimulating signal influence the brain response?
- Are there clearly separable spectral components?
- What is the relationship between the different spectral components of the optical signals and nerve impulses?

Acknowledgement

I would like to thank Dr. Zsolt Temesvári and Ildikó Grega for organizing this conference, my supervisor Dr. Ingo Schiessl and my advisor Dr. John Gigg for their help at the University of Manchester, the head of the BMF KVK Institute of Information Technology, Dr. György Lukács, for the support received from the Institute, the British Biotechnology and Biological Sciences Research Council (BBSRC) for the three-year scholarship they awarded, and Dr. Melanie Burke and Dr. Shane Mckie for the kind donation of human MRI scans.

Last but not least, I would like to thank my wife, Dr. Gabriella Juhász, for her help in understanding the physiological parts, and to my family for putting up with my keyboarding late into the night.

References

- [1] Kandel, E. R., Schwartz, J. H., and Jessel, T. M. "Principles of neural science", New York; *London McGraw-Hill*. 2000
- [2] Hodgkin, A. L., and Huxley, A. F. "Action potentials recorded from inside a nerve fiber." *Nature*, 144, pp. 710-711. 1939
- [3] Rieke, F., Warland, D., Steveninck, R. d. R. v., and Bialek, W. (). Spikes: "Exploring the Neural Code," *Cambridge, Massachusetts: A Bradford Book, The MIT Press*. 1997
- [4] Toga, A. W., and Mazziotta, J. C. "Brain Mapping: The Method." *Academic Press*. 2002
- [5] Hillman, E. M. "Optical brain imaging in vivo: techniques and applications from animal to man." *J Biomed Opt*, 12(5), 051402. 2007
- [6] Schiessl, I., Stetter, M., Mayhew, J. E., McLoughlin, N., Lund, J. S., and Obermayer, K. "Blind signal separation from optical imaging recordings with extended spatial decorrelation." *IEEE Trans Biomed Eng*, 47(5), 573-7. 2000

-
- [7] Berwick, J., Johnston, D., Jones, M., Martindale, J., Martin, C., Kennerley, A. J., Redgrave, P., and Mayhew, J. E. "Fine detail of neurovascular coupling revealed by spatiotemporal analysis of the hemodynamic response to single whisker stimulation in rat barrel cortex." *J Neurophysiol*, 99(2), 787-98. 2008
- [8] Kleinfeld, D., Ahissar, E., and Diamond, M. E. "Active sensation: insights from the rodent vibrissa sensorimotor system." *Curr Opin Neurobiol*, 16(4), 435-44. 2006
- [9] Zheng, Y., Johnston, D., Berwick, J., and Mayhew, J. "Signal source separation in the analysis of neural activity in brain." *Neuroimage*, 13(3), 447-58. 2001

The Biópio Photovoltaic Power Plant: A Strategic Model for Sustainable Energy Development in Angola and Sub-Saharan Africa

Adelino João Ganga Ngunza¹, Ervin Rácz²

¹ Doctoral School of Applied Informatics and Applied Mathematics,
Obuda University, Bécsi út 96/B., H-1034 Budapest, Hungary -
F0INVA@stud.uni-obuda.hu

² Kando Kalman Faculty of Electrical Engineering, Obuda
University, Bécsi út 96/B., H-1034 Budapest, Hungary -
racz.ervin@uni-obuda.hu

Abstract: The Biópio Photovoltaic Power Plant plays a strategic role in Angola's national energy diversification, operating with 509,040 monocrystalline modules and 63 utility-scale inverters connected to the North-Central Interconnected System. Despite its substantial daytime generation capacity, surrounding communities continue to experience persistent nighttime electricity shortages, exposing limitations in grid stability, distribution capacity, and the lack of integrated storage systems. Between 20 and 26 August 2025, extensive field measurements were conducted to evaluate the plant's real-world performance. Hourly monitoring of direct current (DC) voltage, current, and power revealed a strong linear correlation between solar irradiance and DC power generation. The daily operational profile consistently exhibited a single-hump curve peaking around midday, while overall system efficiency—ranging between 98.5% and 99.5%—confirmed the high reliability of the inverters and stable DC-side behavior. Although the plant demonstrates robust daytime performance, the recurring nighttime energy deficits highlight the need for complementary technological solutions. Based on observed trends, this study recommends the partial hybridization of selected sections of the plant—particularly Block A1—through battery-storage integration or the implementation of targeted off-grid subsystems. Such measures would mitigate grid dependency, enhance post-sunset load management, and increase local energy security. These findings provide a strong technical basis for future work on AC-side analysis, battery system sizing, hybrid PV-storage optimization, and cost-benefit evaluations to improve the resilience and sustainability of large-scale renewable power infrastructures in Angola.

Keywords: solar irradiance; DC performance analysis; photovoltaic power plant; energy distribution; hybrid renewable systems; inverter efficiency; Angola; Biópio Solar Plant; grid stability.

I. Introduction

1. Introducing the Topic

The rapid growth in electricity demand in Angola, combined with the need to diversify the national energy matrix and reduce dependence on fossil fuels, has led to major investments in large-scale photovoltaic power plants. Among these initiatives, the Biópio Photovoltaic Power Plant, located in the province of Benguela, stands out as one of the largest and most strategic renewable energy projects in the country. However, despite the presence of this large-scale infrastructure, several nearby cities continue to experience regular power interruptions, especially during the evening hours. This situation raises important questions regarding the efficiency of the national power system and its distribution capacity, as emphasized in recent studies on renewable planning, system integration, and energy sustainability in Angola [1][6].

2. Reason for Visiting the Biópio Power Plant

The technical visit to the Biópio Photovoltaic Power Plant was motivated by the need to:

- Evaluate the real performance of the photovoltaic system under outdoor environmental conditions;
- Analyze DC parameters (voltage, current, and power) under different irradiance levels;
- Understand the operational behavior of the plant, including efficiency, hourly variations, and stability;
- Relate the plant's energy production to the supply problems faced by villages and communities in the Biópio region, which continue to lack electricity during the night.

Thus, the purpose of the visit was to produce a technical–scientific analysis capable of identifying system limitations, improvement opportunities, and potential solutions, such as the partial implementation of hybrid systems or the installation of battery-storage banks for electrical load management. [6]

3. Introducing the Biópio Power Plant as Part of the Angolan Electric Power System

The Biópio Photovoltaic Power Plant is part of the Angolan Public Electricity System (SEP) and is operated by PRODEL, EP, the state-owned public electricity generation company. [5]

Key characteristics include:

- Installed Capacity: 144.9 MWac (188.9 MWp DC)
- Photovoltaic Modules: 509,040 Q-Cells units (370/375 W)
- Inverters: 63 ABB PVS980 units
- Transmission Infrastructure: 220 kV connection to the North-Central Interconnected System
- National-level contribution:
- Annual reduction of approximately 215 million liters of diesel
- Avoidance of nearly 723,000 tons of CO₂ emissions per year
- Energy supply benefiting around 1.8 million people

The Biópio plant plays a strategic role in the expansion of renewable energy in Angola, increasing installed capacity and reducing production costs in regions historically dependent on thermal power plants. [5]

4. Introducing the Problematic City: Lack of Electricity in the Evenings

Despite the presence of this large-scale photovoltaic facility, several areas, villages, and communes within the municipality of Biópio, in the province of Benguela, continue to face frequent nighttime blackouts.

This issue can be attributed to factors such as:

- Limitations in the distribution infrastructure managed by ENDE, EP;
- Absence of electrical energy storage systems within the photovoltaic plant;
- High dependence on solar generation, which only operates during daylight hours;
- Instability or insufficient capacity of regional power networks;

Technical and non-technical losses within the system.

This paradox: High photovoltaic production during the day but insufficient energy availability at night-constitutes a relevant case study on renewable-energy integration, national grid efficiency, and the need for hybrid solutions and off-grid applications supported by battery-storage banks [6]

Some measurements have been made in summer in 2025. Power values at the Biópio Power Plants in this summer were:

Date: 20/08/2025

Table 1: Measured data of Electric Current (I-DC), Electric Voltage (V-DC), Electric Power P_DC (kw) —
DC=Direct Current

Hour	Current dc (A)	Elect. Voltage (V)	P_dc (kW)
7H	5,31	15	7,97
8H	34,35	15	51,52
9H	57,6	15	86,4
10H	60	15	90
11H	68,21	15	102,31
12H	68,43	15	102,64
13H	68,2	15	102,31
14H	68	15	102
15H	63,6	15	95,4
16H	52,08	15	78,13
17H	17,95	15	26,93

Applied PF = 0.97; line–line voltages (VLL) considered; DC bus VDC = 1500 V (DC BOX 1,500 V); inverter efficiency η = 98.5% (typical for 1.8–2.09 MW plants). Calculations performed hourly with:

$$P_{AC} = (\text{average } I) (\text{average } PF),$$

$$P_{DC} = , I_{DC}$$

Next day data collections have been made.

Date: 21/08/2025

Table 2: Measured data of Electric Currents (I-DC), Electric Voltage (V-DC), Electric Power P_DC (kW) — DC=Direct Current

Hour	Current (A)	DC	Elect. Voltage (V) DC	P_DC (kW)
7H	4.167895	15		6.251842
8H	14.732399	15		22.098599
9H	19.429825	15		29.144738
10H	44.195550	15		66.293325
11H	44.526854	15		66.790281
12H	62.424073	15		93.636109
13H	85.086529	15		127.629793
14H	92.237047	15		138.355571
15H	104.931816	15		157.397725
16H	80.769402	15		121.154103
17H				

Performance at stansted test conditions in DC

Nominal Power, P_MPP: 370 W

Open-Circuit Voltage, V_OC: 48.15 V

Short-Circuit Current, I_SC: 9.94 A

Current at Maximum Power, I_MPP: 9.43 A

Voltage at Maximum Power, V_MPP: 39.22 V

Maximum System Voltage, V_SRS: 1500 V

Something similar were made on the next day:

Date: 22/08/2025

Table 3: Measured data of Electric Current (I-DC), Electric Voltage (V-DC), Electric Power P_DC (kW) —
DC=Direct Current

Hour	Current1. DC	Current2. DC	Current3. DC	P_DC_φ1 (kW)	P_DC_φ2 (kW)	P_DC_φ3 (kW)	V0_DC
7H	4.579	4.909	4.671	6.869	7.364	7.007	15
8H	20.533	20.742	20.781	30.800	31.113	31.172	15
9H	35.581	35.651	36.130	53.371	53.477	54.195	15
10H	38.329	38.675	39.186	57.493	58.012	58.779	15
11H	40.390	40.054	40.991	60.586	60.081	61.487	15
12H	40.298	40.547	40.899	60.448	60.820	61.349	15
13H	40.231	40.087	40.798	60.347	60.130	61.196	15
14H	39.136.	39.310	40.035	58.704	58.964	60.053	15
15H	39.269	40.087	39.518	58.903	58.341	59.278	15
16H	33.280	39.310					15
17H	33.537	38.894					15

Performance at stansted test conditions in DC

Nominal Power, P_MPP: 370 W

Open-Circuit Voltage, V_OC: 48.15 V

Short-Circuit Current, I_SC: 9.94 A

Current at Maximum Power, I_MPP: 9.43 A

Voltage at Maximum Power, V_MPP: 39.22 V

Maximum System Voltage, V_SRS: 1500 V

On the next day data also have been collected:

Date: 23/08/2025

Table 4: Measured data of Electric Current (I-DC), Electric Voltage (V-DC), Electric Power P_DC (kW) —
DC=Direct Current

Hour	Current 1.DC	Current2. DC	Current3 . DC	P_DC_φ1 (kW)	P_DC_φ2 (kW)	P_DC_φ3 (kW)	V0_D C
7H	0.774	0.860	0.774	1.161	1.290	1.1461	15
8H	2.276	2.363	2.276	3.414	3.545	3.414	15
9H	2.496	2.614	2.572	3.745	3.921	3.858	15
10H	2.496	2.377	2.334	3.386	3.565	3.501	15
11H	2.257	2.639	2.605	3.754	3.959	3.908	15
12H	2.503	2.418	2.384	3.436	3.627	3.576	15
13H	2,291	2.211	2.279	3.151	3.317	3.3418	15
14H	2.101	2.489	2.463	3.567	3.733	3.695	15
15H	2.378	2.510	2.485	3.701	3.765	3.727	15
16H							
17H							

Performance at stansted test conditions in DC:

Nominal Power, P_MPP: 370 W

Open-Circuit Voltage, V_OC: 48.15 V

Short-Circuit Current, I_{SC} : 9.94 A

Current at Maximum Power, I_{MPP} : 9.43 A

Voltage at Maximum Power, V_{MPP} : 39.22 V

Maximum System Voltage, V_{SRS} : 1500 V

On the coming day one more data collection were made:

Date: 24/08/2025

Table 5: Measured data of Electric Currents (I_1 , I_2 , I_3) in AC sides — AC=Alternating Current (with frequency)

Hour	Current (I_1)	Current (I_2)	Current (I_3)	Frequency	Elect. Voltage (kV)
7H	21.5	23.2	22.5	50	2177
8H	28.0	29.9	28.6	50	214.5
9H	214.0	214.6	216.7	50	218.7
10H	225.8	225.1	226.1	50	218.1
11H	251.9	249.9	251.1	50	222.2
12H	259.3	258.6	258.1	50	215.7
13H	257.7	217.7	256.3	50	214.4
14H	218.0	218.0	218.0	50	223.8
15H	183.8	184.4	184.6	50	223.5
16H	114.1	115.3	115.2	50	223.5
17H	36.4	37.9	36.8	50	222.0

Date: 24/08/2025 — maximum irradiance: 675.10 W/m²; inverters active: 61; Power Factor: 1; Inverter Frequency: 50 Hz; daily maximum peak: 96.21 MW. Line-line voltages (VLL) considered, assuming DC bus VDC = 1500 V (DC

BOX 1,500 V) and inverter efficiency $\eta = 98.5\%$ (typical for 1.8–2.09 MW plants). Calculations performed hourly.

Table 6: Measured data of Electric Current (I-DC), Electric Voltage (V-DC), Electric Power P_{DC} (kW) —
DC=Direct Current

Hour	Current1.D C	Current2. DC	Current3.DC	P_dc_φ1 (kW)	P_dc_φ2 (kW)	P_dc_φ3 (kW)	V0_ DC
7H	1.829	1.974	1.914	2.743	2.960	2.871	15
8H	2.347	2.506	2.397	3.520	3.759	3.596	15
9H	18.288	18.340	18.519	27.433	27.509	27.779	15
10H	19.244	19.184	19.269	28.866	28.77	28.904	15
11H	21.872	21.698	21.802	32.808	32.547	32.703	15
12H	21.856	21.797	21.755	32.784	32.695	32.632	15
13H	21.590	18.239	21.473	32.385	27.358	32.209	15
14H	19.065	19.065	19.065	28.597	28.597	28.597	15
15H	16.052	16.105	16.122	24.078	24.157	24.183	15
16H	9.965	10.070	10.061	14.947	15.105	15.092	15
17H	3.158	3.288	3.192	4.736	4.932	4.789	15

Performance at stansted test conditions in DC:

Nominal Power, P_{MPP} : 370 W

Open-Circuit Voltage, V_{OC} : 48.15 V

Short-Circuit Current, I_{SC} : 9.94 A

Current at Maximum Power, I_{MPP} : 9.43 A

Voltage at Maximum Power, V_{MPP} : 39.22 V

Maximum System Voltage, V_{SRS} : 1500 V

Summarizing the Power measurements at Biópio Power Plant we can say the followings:

Table 7: Power Measurements at Biópio Power Plant; String and Block Configuration — Biópio

Category	Module (Wp)	Modules in Series per String	Strings in Parallel (Total)	Power Blocks (n)	Strings per Block
Standard Block A1	370	30	9504	32	297.00
Standard Block A2	375	30	3432	32	107.25
Standard Block B	370	30	4032	32	126.00

This table illustrates how each block is sized to achieve the required total power capacity in large-scale solar projects at the Biopio Photovoltaic Power Plant.

Table 8: DC Measurements; Methods/ Strategy and Remarks

Parameter	Method / Strategy Used	Remarks
DC Voltage (V_DC)	Measured at DC bus/DC boxes (1500 V) and used for hourly calculations.	Nominal DC bus voltage: 1500 V
DC Current (I_DC)	Hourly readings obtained from SCADA/inverter monitoring system.	-----

DC Power (P_DC)	Calculated as $P_{DC} = V_{DC} \times I_{DC}$.	Inverter efficiency considered $\approx 98.5\%$
Power Factor (PF)	PF values applied (e.g., 0.97). PF = 1.00 recorded on 24/08/2025.	Daily PF explicitly recorded only once.

The table describes the strategy for measuring the main direct current parameters and presents notes to support reliable monitoring and performance analysis through the SCADA system at the Biópio Photovoltaic Plant.

In order to better understand the measured results, in the following chapter we would like to present the data measured in graphical format.

5. Experimental results at the Biópio Power Plant

a) Research results at the Biópio-Angola Photovoltaic Power Plant. 20/08/2025

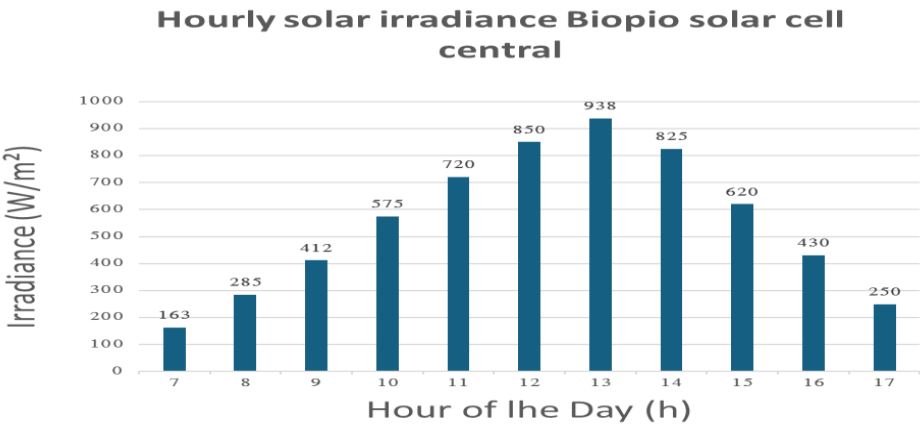


Figure 1: Hourly solar irradiance coming from the Sun and heating up the solar panels installed at the Biópio Power Plant. Data collected on 20th August 2025.

In the coming graph, we plot the efficiency and accuracy of the irradiance as a function of time.

b) Research results at the Biopio-Angola Photovoltaic Power Plant:

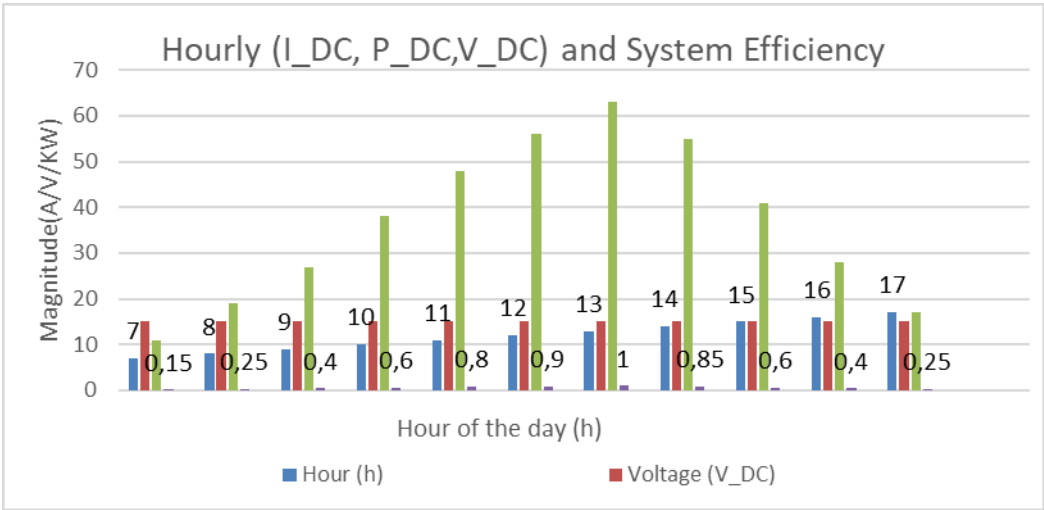


Figure 2: Electric Current, Electric Voltage and Electric Power and System Efficiency. Data measured and results calculated on 20th August 2025.

The Figure 2. shows the hourly variation of V_DC, I_DC, P_DC and system efficiency (η_{sys}) from 7 am to 5 pm at the Biopio Photovoltaic Plant. Current and power gradually increase and reach their peak around 1 pm, while system efficiency approaches 99.5% near noon and decreases in the afternoon.

c) Correlation between Irradiance and DC Power Output:

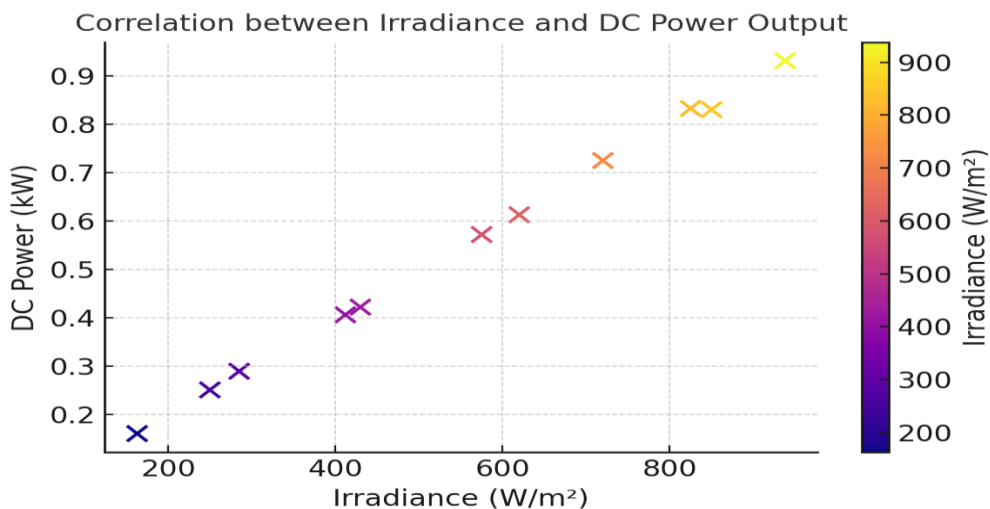


Figure 3: Correlation between sun irradiation and DC Power output data. Data measured and results calculated on 20th August 2025.

Figure 3. shows a strong positive relationship between solar irradiance and DC power output, indicating that power production increases as irradiance rises.

6. Conclusions

The Biopio Solar Power Plant demonstrated high operational stability and consistent direct current (DC) performance under real external environmental conditions. The measured current (I_{DC}), (V_{DV}), (P_{DC}) show a strong correlation with the daily and hourly solar irradiance.

There are problems: During the night, some areas of the city face electricity problems and regular power cuts, even though the fact that the Biopio Photovoltaic Plant is on-grid and connected to the national electricity network in Angola.

Despite the short monitoring period and limited environmental data (wind, humidity, dust), the study provides a solid basis for comparative performance evaluation.

To solve such or sudden power outages, there are ideas and solutions on the market that use a solar power plant to eliminate the resulting power outages. There are solutions in which the batteries of a battery park are charged with electricity generated in a solar power plant, and then during the necessary period - e.g. in the event of power needs or power fluctuations - the fluctuations are

resolved by connecting the charged batteries to the circuit. The electricity fed into the circuit from the batteries connected to the circuit can eliminate and thus solve the existing power fluctuation problem or power outage, which are the consequences of a "power shortage". The shortage can thus be replaced from the battery park. The details of this idea as a solution will be analysed in a later publication.

7. References

- [1] Ammar Ali Mohammed Quran, Róbert Szabolcsi: *Fuzzy Decision-Making for the Optimization of Off-Grid Multisource Power Generation Systems*, **Acta Polytechnica Hungarica**, Vol. 22, No. 1, 2025.
- [2] Domingos Joaquim Francisco, Mikael Jhordan Lacerda Cordeiro, Daniel de Abreu Pereira Uhr, Júlia Gallego Ziero Uhr: *Pathways to sustainable development: an overview of the progress and obstacles of hydroelectric power production in Angola*, **The Journal of World Energy Law & Business**, Volume 17, Issue 5, October 2024, Pages 309–321. <https://doi.org/10.1093/jwelb/jwae012>
- [3] Lemba I.I; Ferreira Dias M.II; Robaina M.II: *Electric energy planning in Namibe, Angola: Inserting renewable energies in search of a sustainable energy mix*; **Journal of Energy in Southern Africa**, ISSN 2413-3051 (online), 1021-447X (print), 32(4), 69–83. <https://doi.org/10.17159/2413-3051/2021/v32i4a9430>
- [4] MCA (Portugal), Sun Africa and direct conversations at the Biopio Solar Power Plant.
- [5] PRODEL – Empresa Pública de Produção de Electricidade, *Brochura Institucional*, Luanda, Angola.
- [6] Vezir Rexhepi and Arben Gjukaj: *Assessing the Impact of Integrating Photovoltaic Systems and Wind Turbines on Power System Stability and Performance Parameters*; **Acta Polytechnica Hungarica**, Vol. 21, No. 11, 2024.

Anyag- és energiaáramok a napelemes rendszerekben: szakirodalmi áttekintés az LCA szemszögéből

Berecz Norbert¹, Gröller György², Ürmös Antal², Nemcsics Ákos²

¹Anyagtudományok és Technológiák Doktori Iskola, Óbudai Egyetem, Népszínház u. 8., H-1081 Budapest, Magyarország

Környezetmérnöki és Természettudományi Intézet, Rejtő Sándor Könnyűipari és Környezetmérnöki Kar, Óbudai Egyetem, Doberdó út 6, H-1034 Budapest, Magyarország

² Mikroelektronikai és Technológia Tanszék, Elektronikai és Kommunikációs Rendszerek Intézet, Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar, Óbudai Egyetem, Tavaszmező utca 17, H-1084 Budapest, Magyarország

berecz.norbert@uni-obuda.hu, groller.gyorgy@kvk.uni-obuda.hu,

urmos.antal@kvk.uni-obuda.hu, nemcsics.akos@kvk.uni-obuda.hu

Absztrakt: A fotovoltaikus rendszerek elterjedése új környezeti és fenntarthatósági kihívásokat hoz magával. A tanulmány az életciklus-elemzés (LCA) módszerével vizsgálja a különböző generációs PV technológiák anyag- és energiaáramait a nyersanyag-kitermeléstől az újrahasznosításig. A kristályos szilícium rendszerek dominánsak, de energiaigényesek; a vékonyrétegű megoldások kedvezőbb környezeti profilt mutatnak, ugyanakkor néhány esetben ritka és toxikus elemeket tartalmaznak. A harmadik generációs technológiák ígéretesek, de stabilitásuk néhány esetben még korlátozott. A kiforrott technológiájú és helyesen legyártott napelem hosszú élettartamú, ennek ellenére foglalkoznunk kell az életciklusával. Az újrahasznosítás technológiaként eltérő megközelítést igényel, és kulcsszerepet játszik a körforgásos gazdaságban. A tanulmány kiemeli a szabályozási környezet, az infrastruktúra és a gyártói felelősség fejlesztésének fontosságát.

Kulcsszavak: szilícium, ritkaföldfémek, többgenerációs napelemek, életciklus-elemzés, napelemek újrahasznosítása, GaAs

1 Bevezetés

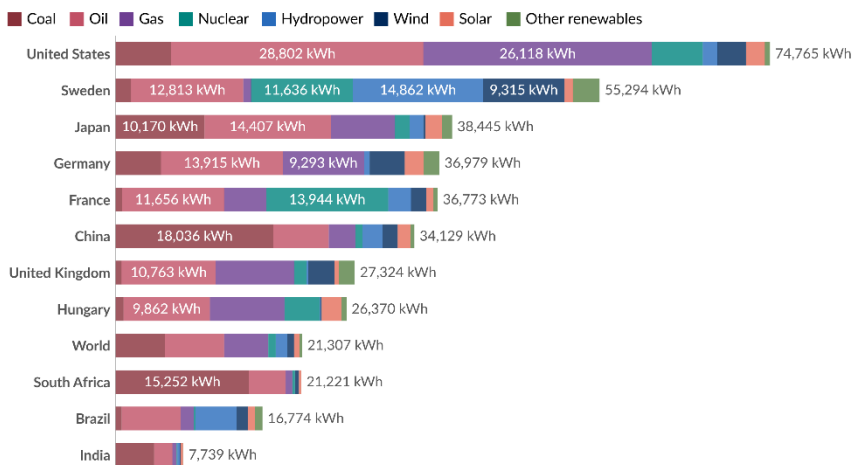
Az elmúlt években, illetve évtizedekben a napelemes rendszerek gyártása és telepítése iránt világszerte dinamikusan növekvő igény mutatkozik, amely jól tükröződik a globális energiamix átalakulásában. Ennek ellenére az energiaellátásban továbbra is meghatározó szerepet töltenek be a fosszilis energiahordozók (1. ábra) [1].

A fosszilis energiahordozók hatalmas szerepet játszanak a környezet terhelésében, különösen az üvegházhatású gázok kibocsátása révén, amely jelentős mértékben hozzájárul a globális felmelegedéshez és az éghajlatváltozáshoz. Ezzel szemben a megújuló energiaforrások, különösen a napelemes rendszerek, lehetőséget kínálnak az energiaellátás dekarbonizációjára.

Per capita primary energy consumption by source, 2024

Our World in Data

Primary energy¹ is measured in kilowatt-hours² per person, using the substitution method³.



Data source: Energy Institute - Statistical Review of World Energy (2025); Population based on various sources (2024)
OurWorldinData.org/energy-mix | CC BY

32. ábra: Globális energiamix (2024) [2]

A napelemes rendszerek iránti növekvő kereslet mögött összetett tényezők állnak, amelyek közé tartoznak a globális geopolitikai átrendeződések, a folyamatos népességnövekedés, valamint a környezeti fenntarthatóság iránti egyre sürgetőbb társadalmi és gazdasági igények. Emellett az elektromobilitás gyors térnyerése is jelentős hatással van az energiaigények szerkezetére, tovább ösztönözve a tiszta, decentralizált energiatermelési megoldások, így a fotovoltaiikus rendszerek alkalmazását. [3].

A napelemes rendszerek gyártásának és telepítésének igénye az elmúlt évtizedekben jelentős növekedést mutatott, válaszul a globális energiamix dekarbonizációs törekvéseire. Bár a fosszilis energiahordozók továbbra is meghatározó szerepet töltenek be, környezeti terhelésük – különösen az üvegházhatású gázok kibocsátása révén – sürgeti az alternatív, fenntartható technológiák térnyerését. A megújuló energiaforrások, ezen belül a fotovoltaikus rendszerek, ígéretes lehetőséget kínálnak a tiszta energiatermelésre, ugyanakkor teljes környezeti hatásuk csak a teljes életciklusuk figyelembevételével értékelhető. Az életciklus-elemzés (Life Cycle Assessment, LCA) módszertana lehetőséget biztosít a „bölcsőtől a sírig” elv alapján történő vizsgálatra, amely magában foglalja a nyersanyag-kitermelést, a gyártást, az üzemeltetést, valamint az életciklus végén történő újrahasznosítást [4, 5]. A különböző generációs PV technológiák eltérő anyag- és energiaáramokat, valamint újrahasznosítási lehetőségeket képviselnek [6], amelyek tudományos értékelése elengedhetetlen a fenntartható fejlődés szempontjából.

A szakirodalmi áttekintés foglalkozik a fotovoltaikus technológiák fejlődésével, különös tekintettel az életciklus-elemzés (LCA) alkalmazására, amely lehetővé teszi a rendszerek környezeti hatásainak átfogó értékelését. Emellett kiemelésre kerülnek a harmadik generációs, koncentrátoros GaAs-alapú napelemek, amelyek magas hatásfokuk és speciális anyagtulajdonságaik révén ígéretes alternatívát jelentenek a jövő nagy teljesítményű PV rendszerei számára.

2 A napelemek fejlődésnek áttekintése

A napenergia közvetlen hasznosításának lehetősége – a fotovoltaikus hatás – az energetikai átmenet kulcseleme lett, amely nélkülözhetetlen a globális dekarbonizációs törekvések megvalósításában. A napelemes rendszerek fejlődése nemcsak technológiai, hanem gazdasági és társadalmi szempontból is jelentős: immár lehetőséget kínálnak decentralizált, tiszta energiatermelésre, az ipari infrastruktúra részévé válva, mindemelllett csökkentik az üvegházhatású gázok kibocsátását és fokozzák az energiafüggetlenséget.

2.1. Történeti és technológiai fejlődés

2.1.1. Az első lépések a napelemes technológia felé

A fotovoltaikus technológia alapjait már a 19. században lefektették. 1839-ben Alexandre Edmond Becquerel fedezte fel a fotovoltaikus hatást [8], amikor kimutatta, hogy fény hatására bizonyos anyagok elektromos áramot generálnak.

Ezt követően, 1883-ban Charles Fritts amerikai feltaláló készítette el az első „modern” napelemet szelénből, aranybevonattal, bár annak hatásfoka kevesebb mint 1% volt [9]. Az 1880-as és 1890-es években olyan kutatók, mint Heinrich Hertz, Alekszandr Sztoletov és Wilhelm Hallwachs, tovább mélyítették a fotoelektromos jelenség fizikai megértését, amelynek elméleti alapjait Albert Einstein 1905-ben publikálta, és amelyért később Nobel-díjat kapott. Ez a felfedezés nemcsak a fotovoltaiikus technológia fejlődését alapozta meg, hanem új kutatási irányt nyitott a kvantumfizikában is [10].

2.1.2. Félvezető technológia és gyakorlati alkalmazás

A modern félvezető alapú napelemek története az 1940-es évekre nyúlik vissza, amikor Russel Ohl szabadalmaztatta az első szilícium alapú fotovoltaiikus eszközt, a pn-átmenet felfedezése nyomán. Ez a technológiai áttörés alapozta meg a későbbi ipari fejlesztéseket, amelyek közül kiemelkedik az 1954-ben a Bell Laboratories által bemutatott első ipari szilícium napelem. A Chapin, Fuller és Pearson nevéhez fűződő cella mintegy 6%-os hatásfokkal működött, és megbízhatósága révén hamar alkalmazásra került az űrkutatásban [11], [12], [13].

Az 1960-as években az űrprogramok, különösen a NASA műholdas küldetesei, jelentős ösztönzést adtak a fotovoltaiikus technológiák fejlesztésének. A napelemek energiaellátási célú alkalmazása a világűrben új követelményeket támasztott a megbízhatóság, a tömeg és a hatásfok tekintetében. A technológia szélesebb körű alkalmazhatóságát a gyártástechnológia fejlődése – például az integrált áramkörök elterjedése és a cellahibák csökkentése – tette lehetővé, ami megalapozta a földi felhasználás irányába történő elmozdulást is [14].

2.1.3. Szélesebb körű elterjedés és ipari forradalom

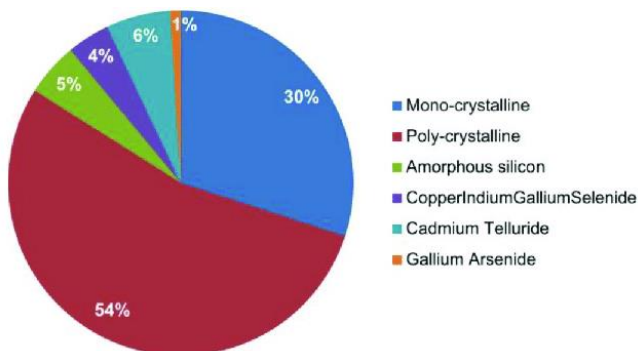
A fotovoltaiikus technológia fejlődését nemcsak tudományos áttörések, hanem gazdasági és geopolitikai tényezők is jelentősen befolyásolták. Az 1970-es és 1980-as évek olajválságai új lendületet adtak a megújuló energiaforrások kutatásának, különösen a napelemes rendszerek fejlesztésének. A kormányzati támogatások és célzott kutatás-fejlesztési programok hatására a napelemek gyártási költsége drasztikusan csökkent: míg az 1970-es évek elején 1 wattnyi teljesítmény előállítása mintegy 100 amerikai dollárba került, ez az érték az évtizedek végére 20 dollár alá esett [15].

Az ezredfordulót követően a napelemek globális kapacitása exponenciális növekedésnek indult, amit nemcsak a technológiai fejlődés, hanem a klímavédelmi célkitűzések és az energiapolitikai átalakulások is ösztönöztek [16]. A fejlesztések fókuszába egyre inkább a hatásfok növelése, a hosszú távú tartósság biztosítása, valamint az anyagkímélő újrahasznosíthatóság és környezetbarát gyártástechnológia került. Ezek a szempontok egyre fontosabbá

váltak az életciklus-elemzés (LCA) alapú értékelésekben is, amelyek a technológia fenntarthatóságát a teljes életút mentén vizsgálják.

2.1.4. Technológiai generációk

A fotovoltaikus technológiák fejlődése három fő generáció mentén írható le, amelyek különböző anyaghasználatot, gyártástechnológiát, energiaigényt, alkalmazási lehetőségeket és környezeti hatásokat képviselnek. Ezen generációk típusainak megoszlását mutatja be a 2. ábra:



33. ábra: Globális piaci eloszlás a különböző napelemtípusok esetében [17]

Első generáció: A mono- és polikristályos szilícium cellák alkotják a jelenlegi globális PV piac alapját. Ezek a technológiák stabil működést, hosszú élettartamot és viszonylag magas, 15–18 (világűri alkalmazás esetén 24%) közötti hatásfokot jelentenek. A szelet-alapú technológia többszáz mikron vastagságot jelent. A kis abszorpciós képesség okán erre az anyagmennyiségre mindenképpen szükség van. Moduláris kialakításuk és megbízhatóságuk lehetővé tette széles körű elterjedésüket lakossági, ipari és közüzemi méretű rendszerekben egyaránt. A technológia folyamatos fejlesztése révén a heteroátmenetes szerkezet struktúrák laboratóriumi körülmények között már 27% körüli hatásfokot is elérnek [18], [19]. Ugyanakkor a gyártás energiaintenzív, és jelentős mennyiségű szilícium alapanyag felhasználásával jár, ami az életciklus korai szakaszában számottevő környezeti terhelést jelent.

Második generáció: A vékonyréteg-technológiák, mint az amorf-szilícium, CdTe és a CIGS, alacsonyabb anyag- és energiaigényű gyártási folyamatokat tesznek lehetővé, ami kedvezőbb környezeti profilt eredményezhet [20], [21]. Az igen magas abszorpciós képesség okán az elsőgenerációshoz képest két nagyságrenddel vékonyabb struktúra is elegendő. Ezek a napelemek közvetlenül üvegre (de esetenként rugalmas hordozókra is) integrálhatók, így új alkalmazási lehetőségeket nyitnak például épületintegrált PV rendszerekben, könnyűszerkezetes épületeken vagy mobil eszközökön. Bár hatásfokuk jellemzően

kissé alacsonyabb a szilícium alapú rendszerekhez képest, a technológia előnyei közé tartozik a sokkal kisebb anyagfelhasználás, (a rugalmasság) és a gyártás egyszerűsége. Némely esetben a ritka és toxikus elemek – például kadmium és tellúr fordulnak elő benne, de a vékony struktúra okán igen kis mennyiségben – jelenléte azonban újrahasznosítási és környezetvédelmi kihívásokat vet fel, különösen a hulladékkezelés és a szabályozási megfelelés terén.

Harmadik generáció: A legújabb fejlesztések célja a hatásfok további növelése, a gyártási költségek csökkentése és az újrahasznosíthatóság javítása. Ebbe a kategóriába tartoznak a perovszkit alapú cellák, szerves félvezetők, (tandem struktúrák) és kvantumponthasznosító technológiák. Ezek a rendszerek 30-40% hatásfokot is el tudnak érni, de laboratóriumi körülmények között már 60-80% feletti hatásfokot is elértek, különösen több-átmentes konfigurációkban [22], [23], [24], [25].

Különösen kiemelkedő szerepet töltenek be a koncentrátoros gallium-arzenid (GaAs) alapú napelemek, amelyek a harmadik generáció egyik legfejlettebb és legnagyobb hatásfokú megoldását képviselik. [26] A GaAs egy III-V csoportbeli vegyület-félvezető, amelynek direkt tiltott sávja (bandgap) és magas elektronmobilitása kiváló fotovoltaiikus tulajdonságokat biztosít. A koncentrátoros konfigurációkban – ahol a napfényt optikai elemekkel (pl. Fresnel-lencsék, tükrök) fókuszálják a cellára – a GaAs-alapú több-átmenetes rendszerek 40% feletti konverziós hatásfokra is képesek [27], [28], [29], [30].

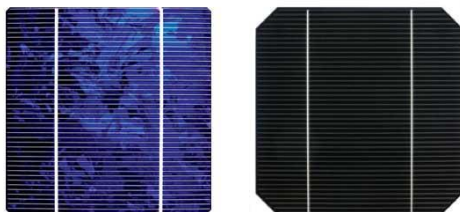
A GaAs cellák különösen alkalmasak űralkalmazásokban, ahol a tömeg, a megbízhatóság és a sugárzásállóság kritikus tényezők. Emellett a technológia potenciált mutat nagy intenzitású napenergia-hasznosításban, például koncentrált PV (CPV) rendszerekben, ahol a rendelkezésre álló felület korlátozott, de a teljesítményigény magas [31].

A GaAs technológia széles körű elterjedését befolyásolja a magas alapanyagköltség, a precíziós gyártástechnológia szükségessége (pl. epitaxiális növesztés). Ezért jött képbe a koncentrátoros megoldás. Ez az új technológia minden bizonnyal hatással van az élettartamra, ami életciklus és hulladékkezelési kihívások elé állítja a szakembereket.

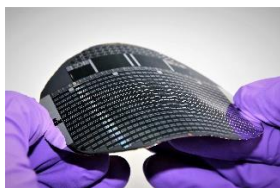
A különböző generációk napelemei a következők (3. ábra):

1. **Monokristályos szilícium cella** [32].
2. **Polikristályos szilícium cella** – az első generáció alapját képezik, magas hatásfokkal és hosszú élettartammal [32].
3. **Gallium-arzenid (GaAs) cella** – koncentrátoros alkalmazásokhoz fejlesztett, kiemelkedő hatásfokú technológia [33].
4. **Kadmium-tellurid (CdTe) cella** – vékonyrétegű megoldás, alacsony anyagigénnyel és kedvező gyártási energiaigénnyel [34].

5. **Perovszkit cella** – harmadik generációs innováció, amely ígéretes hatásfok-növekedést és költségcsökkentést kínál [35].
6. **CIGS (réz-indium-gallium-szelenid) cella** – vékonyrétegű technológia, rugalmas alkalmazási lehetőségekkel [36].
7. **Szerves félvezető (OPV) cella** – könnyű, rugalmas és alacsony gyártási energiaigényű megoldás, bár élettartama korlátozott [37].
8. **Kvantumpontos (QD) cella** – nanoméretű félvezető részecskéken alapuló technológia, amely kiemelkedő spektrális hangolhatóságot és potenciálisan nagyon magas hatásfokot kínál [38].



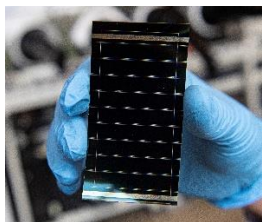
1, 2.



3.



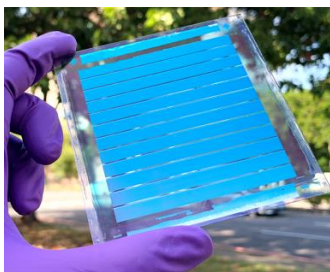
4.



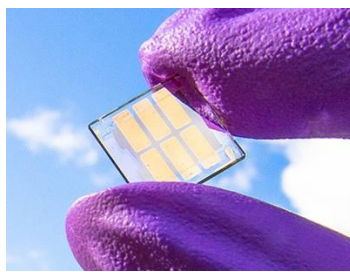
5.



6.



7.



8.

34. ábra: Különböző generációjú napelemcellák

3 Napelemek életciklusa

A fotovoltaikus (PV) rendszerek életciklusának vizsgálata elengedhetetlen a technológia környezeti fenntarthatóságának megítéléséhez. Az életciklus-elemzés (LCA) módszertana lehetőséget biztosít a napelemek teljes életútjának – a nyersanyag-kitermeléstől a gyártáson, használaton és újrahasznosításon át a végső ártalmatlanításig – kvantitatív értékelésére. Ez a megközelítés különösen fontos a fenntartható fejlődési célok (SDG 12) eléréséhez, mivel támogatja az erőforrás-hatékonyságot, a hulladéksökkentést és a környezeti hatások minimalizálását.

A napelem mint struktúra, többnyire valamilyen kristályos félvezető anyagból van, ami nem degradálódik. A degradáció alapvető oka a tokozás időjárásállósága. A hosszú élettartamra tervezett üveg-EVA-üveg tokozású napelem élettartama az építőipari komponensek élettartamával vetekszik, míg a rövidtávú, csak a profitmaximalizálást szemelőtt tartó gyártás - pl. műanyagtokozás - sok feladatot ad az újrahasznosításnak.

3.1. Életciklus szakaszai

A napelemek életciklusa a „bölcsőtől a sírig” elv alapján öt fő szakaszra bontható [31]:

Nyersanyag-kitermelés és előkészítés: A PV rendszerekhez szükséges alapanyagok – például szilícium, ezüst, alumínium, kadmium, tellúr, réz, indium, gallium, arzén – kitermelése és finomítása jelentős energiaigénnyel és környezeti terheléssel jár [39], [40], [41], [42]. A fenntartható technológiák, mint a glicin alapú lúgos kioldás vagy ionos folyadékok alkalmazása, csökkenthetik a környezeti lábnyomot.

Gyártás: A feldolgozott anyagokból PV cellák és modulok készülnek. Az első generációs szilícium cellák gyártása különösen energiaintenzív, míg a vékonyrétegű technológiák (CdTe, CIGS) és a harmadik generációs megoldások (pl. perovszkit, GaAs) alacsonyabb anyagfelhasználással és hőmérsékleten készülnek. [43], [44]

Használat: A telepített napelemek minden bizonnyal sok-sok évtizeden keresztül működnek. Ugyanakkor a teljesítmény idővel csökkenhet (a kristályos napelemek nem degradálódnak, de a tokozásra használt, időjárásnak, karcolódásnak kitett üvegfedés áteresztőképessége csökkenhet, a vékonyréteg napelemek között létezik olyan struktúra, ami idővel lassan degradálódik) és a környezeti tényezők (UV-sugárzás, szálló por súroló hatása, hőmérséklet, páratartalom) hatással vannak az élettartamra [44].

Leszerelés és újrahasznosítás: Az életciklus végén a panelek leszerelésre kerülnek. A komponensek újrahasznosítása – különösen a szilícium, ezüst és üveg esetében – technológiai kihívás, de kulcsfontosságú a körforgásos gazdaság

szempontjából. A veszélyes anyagokat (pl. Cd, As) biztonságosan kell kezelni [44].

Ártalmatlanítás: A nem újrahasznosítható vagy veszélyes hulladékok megfelelő kezelése elengedhetetlen a környezeti kockázatok csökkentéséhez [44].



35. ábra: Napelemek életciklusa [31]

3.2. Technológiai generációk életciklus-értékelése

A fotovoltaikus technológiák fejlődése három fő generáció mentén követhető nyomon, amelyek eltérő anyaghasználatot, gyártási energiaigényt, környezeti hatásokat és újrahasznosítási lehetőségeket képviselnek. Az életciklus-elemzés (LCA) módszertana lehetőséget biztosít ezen technológiák összehasonlító értékelésére, különös tekintettel az energiafogyasztásra, az energia megtérülési időre (EPBT), a globális felmelegedési potenciálra (GWP), valamint a kültéri hatásokra. Az egyes generációk technológiai sajátosságai nemcsak a teljesítményben, hanem a környezeti fenntarthatóságban is jelentős eltéréseket mutatnak, ezért az LCA-alapú összehasonlítás elengedhetetlen a legmegfelelőbb PV rendszer kiválasztásához adott alkalmazási környezetben.

2.3.1. Első generáció – Kristályos szilícium (SC-Si, MC-Si) [45]

- Energiafogyasztás: SC-Si: 19–48 GJ/kW, MC-Si: 19–40 GJ/kW.
- EPBT: SC-Si: 1–4 év, MC-Si: 1–3 év.
- GWP: SC-Si: 40–60 g CO₂-eq/kWh, MC-Si: 30–50 g CO₂-eq/kWh.

- Újrahasznosítás: Vegyi úton történik (HF, HNO₃), az üveg mechanikai és hőkezeléssel választható le.

2.3.2. Második generáció – Vékonyréteg technológiák (CdTe, CIGS) [46]

- Energiafogyasztás: GaAs: 10–20 GJ/kW, CdTe: 3–5 GJ/kW, CIGS: 2–4 GJ/kW.
- EPBT: GaAs: 5.77–6.94 év, CdTe: 0.8–5.05 év, CIGS: 1.87–9.44 év.
- GWP: GaAs: 40–70 g CO₂-eq/kWh, CdTe: 19–30 g CO₂-eq/kWh, CIGS: 20–40 g CO₂-eq/kWh.
- Újrahasznosítás: Cd és Te különböző ipari melléktermékekből nyerhető ki, GaAs gyártása során az As kezelése különös figyelmet igényel.

2.3.3. Harmadik generáció – Új anyagok és koncentrátoros technológiák (GaAs, PSC, OPV, DSSC, QD-SC, CPV) [47]

- Energiafogyasztás: CPV: 4.3–13 GJ/kW, OPV: 4–7 GJ/kW, PSC: 3–6 GJ/kW, DSSC: 2.5–4.8 GJ/kW, QD-SC: 1.5–2 GJ/kW.
- EPBT: CPV: 0.26–0.39 év, PSC: ~0.2 év, OPV: 0.2–4 év, DSSC: ~1.08 év.
- GWP: CPV: 30–50 g CO₂-eq/kWh, PSC: 20–60 g CO₂-eq/kWh, OPV: 5–25 g CO₂-eq/kWh, QD-SC: ~5 g CO₂-eq/kWh.
- Kiemelt technológia – GaAs: A GaAs cellák kiemelkedő hatásfokuk (29–33%) és koncentrátoros alkalmazhatóságuk révén különösen ígéretesek. Ugyanakkor gyártásuk energiaigényes, és az As kezelése komoly környezetvédelmi kihívásokat jelent.

3.3. Fenntarthatósági kihívások és javaslatok

A napelemes rendszerek életciklusának fenntarthatósága számos technológiai, környezeti és gazdasági kihívással szembesül, amelyek az alapanyagok kitermelésétől kezdve a gyártáson és használaton át az újrahasznosításig terjednek. Az alábbiakban részletesen bemutatjuk a legjelentősebb problématerületeket és az ezekre adott válaszokat.

Anyagintenzitás

A PV technológiákban igen kis mennyiségben alkalmazott ritka és toxikus elemek – mint például a kadmium (Cd), arzén (As), ólom (Pb), gallium (Ga), indium (In) és tellúr (Te) – jelentős környezeti és egészségügyi kockázatokat hordoznak. Ezek

az anyagok gyakran melléktermékként keletkeznek más ipari folyamatokban, így kitermelésük és tisztításuk komplex, energiaigényes és veszélyes. A második generációs technológiák (pl. CdTe, CIGS) különösen érintettek, míg a harmadik generációs megoldások (pl. perovszkitek, GaAs) újabb, de szintén kritikus anyagokat használnak. A fenntarthatóság érdekében elengedhetetlen a toxikus komponensek kiváltása bőségesen rendelkezésre álló, nem mérgező alternatívákkal, valamint a zárt körű anyaghasználat és a körforgásos gazdaság elveinek alkalmazása [39].

Energiaigény

A napelemek gyártása – különösen az első generációs kristályos szilícium (SC-Si, MC-Si) és a GaAs-alapú rendszerek esetében – rendkívül energiaintenzív. A szilícium tisztítása, kristályosítása és a cellák előállítása magas hőmérsékletet és jelentős villamosenergia-felhasználást igényel, amelynek környezeti hatása nagymértékben függ a gyártás helyszínének energiamixétől. A GaAs cellák gyártása szintén magas energiaigénnyel jár, különösen a koncentrátoros konfigurációk esetében, ahol optikai elemek és követőrendszerek is szükségesek. A gyártási energia csökkentése érdekében javasolt az alacsony hőmérsékletű, oldat-alapú technológiák (pl. perovszkit, OPV) fejlesztése, valamint a gyártás áthelyezése alacsony szénintenzitású régiókba [39].

Újrahasznosítási infrastruktúra hiánya

A jelenlegi újrahasznosítási kapacitások elsősorban az első generációs szilícium alapú panelekre koncentrálnak, míg a második és harmadik generációs technológiák esetében az újrahasznosítás technológiai és szabályozási keretei még nem kiforrottak. A vékonyrétegű és szerves cellák esetében a komponensek szétválasztása, a toxikus anyagok kezelése és a gazdaságos visszanyerés komoly kihívást jelent. A jövőbeni fejlesztéseknek ki kell terjedniük a moduláris panelek tervezésére, a zárt hurkú anyagáramokra, valamint a regionális újrahasznosítási kapacitások bővítésére [39].

Relatív rövidebb élettartam és degradáció

A harmadik generációs technológiák – különösen a perovszkit (PSC) és szerves (OPV) cellák – esetében gyakori probléma a relatív gyors degradáció, a kisebb stabilitás és a relatív rövidebb működési élettartam. Ez nemcsak a gazdaságosságot, hanem a fenntarthatóságot is veszélyeztetheti, mivel a cserék növelik a hulladék mennyiségét és az anyagfelhasználást. A megoldás a stabilitás növelése, az időjárásállóság javítása, valamint a hosszú távú teljesítménym adatok gyűjtése és elemzése. Emellett szükséges a szabványosított tesztelési protokollok kidolgozása, amelyek valós környezeti körülmények között értékelik a technológiák tartósságát

3.4 Újrahasznosítási stratégiák

A fotovoltaikus (PV) iparág dinamikus növekedése miatt az elkövetkező évtizedekben jelentős mennyiségű napelem-hulladék keletkezik. Az IRENA előrejelzése szerint 2050-re a PV-hulladék mennyisége elérheti a 78 millió tonnát, ami komoly környezeti és gazdasági kihívást [48]. A napelemek újrahasznosítása nem csupán a hulladékkezelés problémáját oldja meg, hanem hozzájárul a kritikus nyersanyagok – például szilícium, ezüst, indium, gallium és tellúr – visszanyeréséhez, valamint a körforgásos gazdaság megvalósításához.

Az újrahasznosítási technológiák három fő lépésre épülnek:

Delaminálás – a modul rétegeinek szétválasztása mechanikai, termikus vagy kémiai módszerekkel.

Anyagok szétválasztása – üveg, fémek, polimerek elkülönítése különböző fizikai és kémiai eljárásokkal.

Tisztítás és finomítás – a visszanyert anyagok tisztítása és előkészítése újrafelhasználásra [49]

A folyamatok megvalósítása során alkalmazott módszerek lehetnek mechanikai (darálás, szeparálás), termikus (500–650 °C-os hevítés) és kémiai (savak, oldószerek, szuperkritikus CO₂) eljárások. A választott technológia függ a modul típusától és a visszanyerni kívánt anyagoktól.

Kristályos szilícium (c-Si) modulok

A kristályos szilícium alapú modulok a PV-piac több mint 70%-át teszik ki, így újrahasznosításuk kiemelt jelentőségű.

Mechanikai módszerek: a keretek és kábelek eltávolítása után a modulokat darálják, majd optikai és légáramos szeparálással választják szét az üveget, alumíniumot és réz komponenseket. Előnye a vegyszermentesség és alacsony környezeti kockázat, hátránya viszont az alacsony tisztaság és hozam (kb. 85%) (EPRI & NREL, 2018).

Termikus-kémiai módszerek: a polimerek eltávolítása hevítéssel (450–650 °C), majd savas kioldás (HNO₃, HF, NaOH) révén akár 95%-os anyagvisszanyerés érhető el, magas tisztaság mellett [50].

Innovációk: a szuperkritikus CO₂ alkalmazása gyors és környezetbarát delaminálást biztosít, 96%-os üveg-visszanyeréssel, miközben elkerüli a toxikus gázok képződését [51].

Vékonyfilm technológiák (CdTe, CIGS)

A második generációs vékonyfilm modulok újrahasznosítása különösen fontos a ritka és toxikus elemek (Cd, Te, In, Ga) miatt.

Ipari gyakorlat: a First Solar eljárása aprítást és savas kioldást ($\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O}_2$) kombinál, így a Cd és Te visszanyerése 95%-os hatékonysággal történik [52].

EU-LIFE RESOLVED projekt: vákuum blasting és oxidáló savas kezelés alkalmazása, amely akár 99,99%-os hatékonyságot biztosít [53]. A kihívások közé tartozik a magas energiaigény, a vegyszerek környezeti kockázata és a gazdasági megtérülés korlátozott volta.

Organikus és új generációs technológiák

Az organikus PV modulok esetében a kutatás még kezdeti fázisban van. Az alkalmazott módszerek között szerepel az alacsony energiaigényű vízben diszpergálás és szerves oldószeres öblítés [54], valamint az ezüst visszanyerése égetés és savas kezelés révén [55]. A gallium-arszenid (GaAs) cellák újrahasznosítása főként pirolízis és vákuum-metallurgia alkalmazásával történik, amely 93%-os gallium-visszanyerést biztosít [56]. A perovszkit technológia esetében ígéretes megoldás a zárt hurkú újrakristályosítás butilamin segítségével, amely 98,9%-os hatékonyságot ér el, valamint a kationcserés gyanta alkalmazása az ólom eltávolítására [57], [58].

Festékkézenyített cellák (DSSC)

A DSSC modulok újrahasznosítása jelenleg korlátozott, mivel a cellák kompakt szerkezete megnehezíti az anyagok szétválasztását. A mechanikai aprítás és pirometallurgiai eljárások alkalmazhatók, de a fémkinyerési hatékonyság alacsony [59].

Gazdasági és környezeti megfontolások

Az újrahasznosítás környezeti előnyei egyértelműek: a CO_2 -kibocsátás és a toxikus anyagok környezeti terhelése jelentősen csökken. Egy LCA-elemzés szerint a CdTe modulok újrahasznosítása az energiaigényt 81 MJ/m^2 -ről 12 MJ/m^2 -re, a CO_2 -kibocsátást pedig 6 kg/m^2 -ről $2,5 \text{ kg/m}^2$ -re csökkenti [60]. Gazdasági szempontból a jelenlegi költségek $0,08$ – $0,11 \text{ USD/W}$ tartományban mozognak, ami hosszú távon versenyképessé teheti az újrahasznosítást [61]. Ugyanakkor a komplex technológiák és a vegyszerek használata miatt a gazdasági megtérülés még korlátozott, különösen a ritka anyagokat tartalmazó modulok esetében.

Az újrahasznosítási stratégiák fejlődése kulcsfontosságú a PV ipar fenntarthatósága szempontjából. A kristályos szilícium technológia újrahasznosítása a legfejlettebb, míg az új generációs technológiák (organikus, perovszkit) esetében további kutatás szükséges. Bár a módszerek többsége energiaigényes és vegyszereket használ, a környezeti előnyök – például a CO₂-kibocsátás csökkentése és a kritikus anyagok visszanyerése – egyértelműek. A jövőben a gazdasági megtérülés javítása, az energiahatékonyság növelése és a szabályozási keretek kialakítása lesz meghatározó.

4 Összefoglalás

A fotovoltaikus technológia térnyerése meghatározó szerepet játszik a globális energiarendszerek dekarbonizációjában, ugyanakkor jelentős környezeti és gazdasági kihívásokat vet fel. Az életciklus-elemzés (LCA) módszertana lehetőséget biztosít a napelemek teljes életútjának vizsgálatára, amely magában foglalja a nyersanyag-kitermelést, a gyártást, az üzemeltetést és az életciklus végén történő kezelést. Az újrahasznosítás kulcsfontosságú a körforgásos gazdaság megvalósításában, mivel hozzájárul a kritikus nyersanyagok visszanyeréséhez és a hulladék minimalizálásához.

Az újrahasznosítási stratégiák technológiáinként eltérőek, de alapvetően három lépésre épülnek: delaminálás, anyagok szétválasztása és tisztítás. A kristályos szilícium alapú modulok esetében mechanikai, termikus és kémiai módszerek kombinációja alkalmazható, míg a vékonyrétegű technológiák esetében a ritka és toxikus elemek biztonságos kezelése jelent kihívást. Az új generációs megoldások, mint a perovszkit és a GaAs-alapú cellák, ígéretesek a hatásfok és költségcsökkentés szempontjából, azonban újrahasznosításukhoz innovatív eljárások szükségesek.

A fenntarthatóság érdekében elengedhetetlen a szabályozási keretek fejlesztése, az újrahasznosítási infrastruktúra bővítése és a gyártói felelősség erősítése. A jövő kulcsa az energiahatékony gyártás, a toxikus anyagok kiváltása és a körforgásos gazdaság elveinek következetes alkalmazása.

Források

- [1] Global Electricity Review 2025 <<https://ember-energy.org/latest-insights/global-electricity-review-2025>> ; 2025
- [2] Energy Institute - Statistical Review of World Energy (2025); Population based on various sources (2024) – with major processing by Our World in Data. “Coal consumption per capita” [dataset]. Energy Institute, “Statistical Review of World Energy”; Various sources, “Population” [original data].

-
- [3] IEA (2025), Global Energy Review 2025, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2025>, Licence: CC BY 4.0
- [4] R. Frischknecht, P. Stolz, L. Krebs, M. de Wild-Scholten, P. Sinha, V. Fthenakis, H. C. Kim, M. Rauei, M. Stucki, 2020, Life Cycle Inventories and Life Cycle Assessment of Photovoltaic Systems, International Energy Agency (IEA) PVPS Task 12, Report T12-19:2020.
- [5] Hernández-López Daniela-Abigail, Marisela I. Vega-De-Lille, Julio C. Sacramento-Rivero, Carmen Ponce-Caballero, Amina El-Mekaoui, Freddy Navarro-Pineda: Life cycle assessment of photovoltaic panels including transportation and two end-of-life scenarios: Shaping a sustainable future for renewable energy, Renewable Energy Focus, Volume 51, 2024, 100649, ISSN: 1755-0084, <https://doi.org/10.1016/j.ref.2024.100649>, <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1755008424001133>>
- [6] Zahedi, Rahim, Moosavian, Seyed Farhan, Aslani, Alireza, Environmental and damage assessment of transparent solar cells compared with first and second generations using the LCA approach, Energy Science & Engineering, Volume 10, ISSN: 2050-0505, <<https://doi.org/10.1002/ese3.1294>>
- [7] W.W. Anderson, Y.G. Chai, Becquerel effect solar cell, Energy Conversion, Volume 15, Issues 3–4, 1976, Pages 85–94, ISSN 0013-7480, <[https://doi.org/10.1016/0013-7480\(76\)90020-6](https://doi.org/10.1016/0013-7480(76)90020-6)>, <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0013748076900206>>
- [8] Charles Fritts: Effect of Light on Selenium During the Passage of An Electric Current, Nature 7, 303 (1873). <<https://doi.org/10.1038/007303e0>>
- [9] Gevorkian, P. Sustainable Energy System Engineering: The Complete Green Building Design Resource, McGraw-Hill Education, 2007
- [10] Deambi, Suneel. *Solar PV Power: A global perspective*. The Energy and Resources Institute (TERI), 2011.
- [11] Atib Mohammad Oni, Abu S.M. Mohsin, Md. Mosaddequr Rahman, Mohammed Belal Hossain Bhuiyan, A comprehensive evaluation of solar cell technologies, associated loss mechanisms, and efficiency enhancement strategies for photovoltaic cells, Energy Reports, Volume 11, 2024, Pages 3345–3366, ISSN 2352-4847, <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2024.03.007>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484724001525>)
-

- [12] Hoang, Samantha. "The environmental history of solar photovoltaic cells." (2017).
- [13] Smith, K. D., et al. "The solar cells and their mounting." *Bell System Technical Journal* 42.4 (1963): 1765-1816.
- [14] Kamal, Neel, and K. P. Singh. "Research Review of Solar Photovoltaic Electrical Power Generation." *Ge-International Journal of Engineering Research* 2.8 (2014): 47-57.
- [15] J. Garofalo, An electricity regulation primer—the history of electricity regulation in the United States, *Available at SSRN* 3974880, 2021, doi: <https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3974880>.
- [16] Green, Martin A., et al. "Solar cell efficiency tables (version 39)." *Progress in photovoltaics: research and applications* 20.1 (2012): 12-20.
- [17] G. Moreno, W. Emilio, Ullmann, Andressa, dos Santos, Litiéle, Lourega, Photovoltaic Solar Energy: Is It Applicable in Brazil? –A Review Applied to Brazilian Case, *Materials and Geoenvironment* Volume 66, 10.2478/rmzmag-2019-0012
- [18] Ayman Mdallal, Ahmad Yasin, Montaser Mahmoud, Mohammad Ali Abdelkareem, Abdul Hai Alami, Abdul Ghani Olabi, A comprehensive review on solar photovoltaics: Navigating generational shifts, innovations, and sustainability, *Sustainable Horizons*, Volume 13, 2025, 100137, ISSN 2772-7378, <<https://doi.org/10.1016/j.horiz.2025.100137>>, <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772737825000070>>
- [19] T.M. Razykov, C.S. Ferekides, D. Morel, E. Stefanakos, H.S. Ullal, H.M. Upadhyaya, Solar photovoltaic electricity: Current status and future prospects, *Solar Energy*, Volume 85, Issue 8, 2011, Pages 1580-1608, ISSN 0038-092X, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2010.12.002>, (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X1000366X>)
- [20] H. Kim, K. Cha, V.M. Fthenakis, P. Sinha, T. Hur, Life cycle assessment of cadmium telluride photovoltaic (CdTe PV) systems, *Sol Energy*, 103 (2014), pp. 78-88, 10.1016/j.solener.2014.02.008
- [21] A.M. Bagher, M.M.A. Vahid, M. Mohsen, Types of solar cells and application, *Am J Opt Photon*, 3 (5) (2015), pp. 94-113, [10.11648/j.ajop.20150305.17](https://doi.org/10.11648/j.ajop.20150305.17)
- [22] B. O'Regan, M. Grätzel A low-cost, high-efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO₂ films *Nature*, 353 (6346) (1991), pp. 737-740, [10.1038/353737a0](https://doi.org/10.1038/353737a0)

- [23] T.A. Chowdhury, M.A.B. Zafar, M.-S.-U. Islam, M. Shahinuzzaman, M.A. Islam, M.U. Khandaker Stability of perovskite solar cells: issues and prospects RSC Adv, 13 (3) (2023), pp. 1787-1810, [10.1039/D2RA05903G](https://doi.org/10.1039/D2RA05903G)
- [24] W.-C. Chang, D.-H. Lan, K.-M. Lee, X.-F. Wang, C.-L. Liu, Controlled deposition and performance optimization of perovskite solar cells using ultrasonic spray-coating of photoactive layers ChemSusChem, 10 (7) (2017), pp. 1405-1412, [10.1002/cssc.201601711](https://doi.org/10.1002/cssc.201601711)
- [25] G. Li, R. Zhu, Y. Yang, Polymer solar cells, Nat Photon, 6 (3) (2012), pp. 153-161, [10.1038/nphoton.2012.11](https://doi.org/10.1038/nphoton.2012.11)
- [26] N. Papež, L. Škvarenina, P. Tofel, and D. Sobola, Thermal stability of gallium arsenide solar cells, vol. 10603, pp. 251-256, 2017, doi: <https://doi.org/10.1117/12.2292673>.
- [27] A.K. Pandey, V.V. Tyagi, J.A.L. Selvaraj, N.A. Rahim, S.K. Tyagi, Recent advances in solar photovoltaic systems for emerging trends and advanced applications Renew Sustain Energy Rev, 53 (2016), pp. 859-884, [10.1016/j.rser.2015.09.043](https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.09.043)
- [28] S. P. Philipps, A. W. Bett, K. Horowitz, and S. Kurtz, "Current Status of Concentrator Photovoltaic (CPV) Technology," United States, 2015, <<https://www.osti.gov/biblio/1351597>>
- [29] N. Papež, R. Dallaev, Ş. Tălu, J. Kaštyl, Overview of the current State of gallium arsenide-based solar cells Materials, 14 (11) (2021), [10.3390/MA14113075](https://doi.org/10.3390/MA14113075)
- [30] Á. Nemcsics, Napelemek és nanostruktúrák – az űrtechnikára fejlesztett technológiák szilárd tudományos hátteret biztosítanak a földi alkalmazású napelemfejlesztéseknek, 2025, <<https://www.innoteka.hu/cikk/napelemek-es-nanostrukturak-az-urtechnikara-fejlesztett-technologiak-szilard-tudomanyos-hatteret-biztositanak-a-foldi-alkalmazasu-napelemfejlesztéseknek.3214.html>>
- [31] P.A. Davies, J.C. Miftano, A. Luque, F. López and J.M. Ruiz, Calculations of efficiencies achievable using gallium arsenide and silicon cells mounted together in cavities illuminated by single-stage concentration, Solar Energy Materials and Solar Cells 26 (1992) pp. 203-215
- [32] Finn Peacock, Polycrystalline vs. Monocrystalline Solar Panels, Solarquotes, <<https://www.solarquotes.com.au/panels/photovoltaic/monocrystalline-vs-polycrystalline>>

- [33] H. Helmers, E. Lopez, O. Höhn, D. Lackner, J. Schön, M. Schauerte, M. Schachtner, F. Dimroth, and A. W. Bett, “68.9% efficient GaAs-based photonic power conversion enabled by photon recycling and optical resonance,” *Phys. Status Solidi RRL* 15, 2100113 (2021). <https://doi.org/10.1002/pssr.202100113>, <https://www.ise.fraunhofer.de/en/press-media/press-releases/2021/record-efficiency-68-9-percent-for-gaas-thin-film-photovoltaic-cell.html>>
- [34] Solar Consultant, Cadmium Telluride Solar Cells, <https://solarconsultant.ca/cadmium-telluride-solar-cells>>
- [35] U.S. Department of Energy, Perovskite Solar Cells, <https://www.energy.gov/eere/solar/perovskite-solar-cells>>
- [36] The Ultimate Guide to Thin-Film 2025 <
<https://www.eossolarsolutions.co.uk/solar-explained/thin-film-solar-panels>>
- [37] Chuang-Yi Liao, et al., [Photoactive Material for Highly Efficient and All Solution-Processed Organic Photovoltaic Modules: Study on the Efficiency, Stability, and Synthetic Complexity](#), *Solar RRL* (2021). DOI: 10.1002/solr.202000749
- [38] Dexter Johnson, Quantum Dot Solar Cells Break Conversion Efficiency Record MIT researchers get 9-percent conversion efficiency out of quantum dot solar cells produced through solutions processes, 2014, <https://spectrum.ieee.org/quantum-dot-solar-cells-break-conversion-efficiency-record>>
- [39] Arefin Ittesafun Abian, Sami Azam, David Ompong, Deepika Mathur, Comprehensive review of the material life cycle and sustainability of solar photovoltaic panels, *Solar Energy*, Volume 301, 2025, 113927, ISSN 0038-092X, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2025.113927>., <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X25006905>>
- [40] E. Klugmann-Radziemska, A. Kuczyńska-Łażewska, The use of recycled semiconductor material in crystalline silicon photovoltaic modules production – a life cycle assessment of environmental impacts, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 205 (2020), Article 110259
- [41] N.A. Ludin, *et al.*, Prospects of life cycle assessment of renewable energy from solar photovoltaic technologies: a review, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 96 (2018), pp. 11-28

- [42] M. Daryabor, A. Ahmadi, H. Zilouei, Solvent extraction of cadmium and zinc from sulphate solutions: comparison of mechanical agitation and ultrasonic irradiation, *Ultrason. Sonochem.*, 34 (2017), pp. 931-937
- [43] C. Deferm, *et al.*, Purification of indium by solvent extraction with undiluted ionic liquids, *Green Chem.*, 18 (14) (2016), pp. 4116-4127
- [44] V. Muteri, *et al.*, Review on life cycle assessment of solar photovoltaic panels, *Energies*, 13 (1) (2020), p. 252
- [45] D. Huang, T. Yu, Study on energy payback time of building integrated photovoltaic system, *Proc. Eng.*, 205 (2017), pp. 1087-1092
- [46] A. Maalouf, *et al.*, A comprehensive review on life cycle assessment of commercial and emerging thin-film solar cell systems, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 186 (2023), Article
- [47] 113652B. Lee, D. Fan, S.R. Forrest, A high throughput, linear molecular beam epitaxy system for reduced cost manufacturing of GaAs photovoltaic cells: will GaAs ever be inexpensive enough?, *Sustain. Energy Fuels*, 4 (4) (2020), pp. 2035-2042
- [48] Zita Ngagoum Ndalloka, Harigovind Vijayakumar Nair, Samuel Alpert, Cordula Schmid, Solar photovoltaic recycling strategies, *Solar Energy*, Volume 270, 2024, 112379, ISSN 0038-092X, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2024.112379>, <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X24000732>>
- [49] J. Tao, S. Yu, Review on feasible recycling pathways and technologies of solar photovoltaic modules, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 141 (2015) 108–124, <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2015.05.005>.
- [50] W.H. Huang, W.J. Shin, L. Wang, W.C. Sun, M. Tao, Strategy and technology to recycle wafer-silicon solar modules, *Sol. Energy* 144 (2017) 22–31, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.01.001>.
- [51] E. S. Lovato, L. M. Donato, P. P. Lopes, E. H. Tanabe, and D. A. Bertuol, “Application of supercritical CO₂ for delaminating photovoltaic panels to recover valuable materials,” *J. CO₂ Util.*, vol. 46, no. February, 2021, doi: 10.1016/j.jcou.2021.101477.
- [52] F. Solar, The recycling advantage, *Prog. Photovoltaics Res. Appl.* 19 (5) (2017), pp. 614–626.

- [53] W. Berger, F.G. Simon, K. Weimann, E.A. Alsema, A novel approach for the recycling of thin film photovoltaic modules, *Resour. Conserv. Recycl.* 54 (10) (2010) 711–718, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2009.12.001>.
- [54] Y. Zhou et al., Recyclable organic solar cells on cellulose nanocrystal substrates, 2013. doi: 10.1038/srep01536.
- [55] R.R. Søndergaard, Y.S. Zimmermann, N. Espinosa, M. Lenz, F. Krebs, Incineration of organic solar cells: Efficient end of life management by quantitative silver recovery, *Energy Environ. Sci.* 9 (3) (2016) 857–861, <https://doi.org/10.1039/c6ee00021e>.
- [56] L. Zhan, F. Xia, Y. Xia, B. Xie, Recycle Gallium and Arsenic from GaAs-Based EWastes via Pyrolysis-Vacuum Metallurgy Separation: Theory and Feasibility, *ACS Sustain. Chem. Eng.* 6 (1) (2018) 1336–1342, <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.7b03689>.
- [57] X. Feng, et al., Close-loop recycling of perovskite solar cells through dissolution/recrystallization of perovskite by butylamine, *Cell Reports Phys. Sci.* 2 (2) (2021) 100341, <https://doi.org/10.1016/j.xcrp.2021.100341>.
- [58] B. Chen, C. Fei, S. Chen, H. Gu, X. Xiao, J. Huang, Recycling lead and transparent conductors from perovskite solar modules, *Nat. Commun.* 12 (1) (2021) 1–10, <https://doi.org/10.1038/s41467-021-26121-1>.
- [59] K. Miettunen, A. Santasalo-Aarnio, Eco-design for dye solar cells: From hazardous waste to profitable recovery, *J. Clean. Prod.* 320 (April) (2021) 128743, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128743>.
- [60] M. Held, Life cycle assessment of CdTe module recycling, *Eur. Photovolt. Sol. Energy Conf.* (September) (2009), pp. 21–25.
- [61] V.M. Fthenakis, End-of-life management and recycling of PV modules, *Energy Policy* 28 (14) (2000) 1051–1058, [https://doi.org/10.1016/S0301-4215\(00\)00091-4](https://doi.org/10.1016/S0301-4215(00)00091-4).

Ethical and security dilemmas in the application of AI in a financial institution environment - customer perspective

Judit Schubert

Óbuda University, Doctoral School on Safety and Security Sciences Népszínház
Street 8, H-1081 Budapest, Hungary

Contact e-mail: schubertj1983@gmail.com

Agnes Csiszárik-Kocsir

Óbuda University, Keleti Károly Faculty of Business and Management,
Tavaszmező Street 17, H-1084 Budapest, Hungary

Abstract: The rise of artificial intelligence (AI) in the financial sector creates new opportunities for increasing the efficiency of customer service but also raises serious ethical and security dilemmas. The study aims to explore the effects of the use of AI-based systems on the customer experience, with particular attention to transparency, data protection, discrimination risks and liability issues. The research focuses on customer perceptions: how they perceive AI-driven customer interactions, how much they trust these systems and what concerns they have regarding the use of the technology. The empirical basis of the study is a questionnaire survey conducted among domestic financial institution customers. The results may contribute to the more ethical and secure development of AI applications in the financial sector, as well as to the fine-tuning of regulatory and sustainability frameworks.

Keywords: MI, Ethics, Security, Customer perceptions, MTO

1. Introduction

The spread of artificial intelligence is changing the operation of financial institutions at a rapid pace. Not only from an IT point of view, but also from a human point of view. The EU AI Act and the General Data Protection Regulation (GDPR) regulations have set strict rules for financial institutions regarding the use of AI. Observing and complying with them is not an easy task, but it is not insurmountable. However, the question arises as to what risks artificial intelligence carries or what efficiency can be achieved with its application (Mucsinyi, 2025). In addition to the IT opportunities, the introduction of AI tools

can also generate human risks, concerns and benefits. Just observe the change in the customer experience, for example, at a financial institution where a voicebot operated by AI already answers phone calls. Here, we can no longer observe only a kind of triage operation that prioritizes the requests, but also divides them into categories and flags them. He tries to solve the customer's request or problem, or refers them to an expert administrator. This is a very serious step forward for customer services. A financial institution that has contracts with millions of customers and maintains millions of accounts in all kinds of business lines also has a significant number of customer contacts on call centers. These calls must be handled, and according to the legislation and recommendations, the customer must be directed to an administrator within a reasonable time. The ever-increasing number of customers, the increasingly sophisticated service, and the problems related to electronic administration induce more and more phone calls. The financial institution must provide the workforce necessary for the management of these services. You can hire trainees, student workers, disabled workers or outsource a campaign, but training and retaining employees with the right skills is a big task. Therefore, the introduction of a voicebot or chatbot can definitely be considered an effective solution. With the help of this, customers can get a solution to their problems and requests sooner, thus improving the customer experience.

Although the Hungarian legal environment does not currently require the mandatory inclusion of customer experience developments in financial institutions' sustainability reports or other data services, the presentation of social impacts is becoming more and more prominent in ESG (Environmental, Social, Governance) frameworks. Customer experience – as an indicator of the accessibility, fairness and digital inclusion of services – can indirectly contribute to the assessment of social sustainability. This is particularly relevant in the case of AI-based customer interactions, where the decisions of algorithms can affect customer trust, quality of service and potential discrimination risks. Transparent complaint handling practices, customer service developments and ethical audits of digital services are all elements that, although not mandatory, are becoming increasingly expected within the framework of responsible financial institution operation. Therefore, we have reason to expect that the development of customer experiences will soon appear in a regulation or recommendation in the sustainability reports of financial institutions, thus companies will become more innovative and achieve sustainable growth (Lockard et al, 2025).

For these reasons, the question arises as to what kind of opinion the customers of financial institutions form about the use of artificial intelligence. What ethical and security questions do the operation of customer services, triage, chatbots and voicebots raise, and what do customers think about it? The questionnaire on which the study is based seeks answers to these questions.

2. Literature review

According to media appearances on the internet, artificial intelligence is now appearing in the operation of financial institutions in a number of processes. It can be customer service, credit scoring or fraud prevention, just to name a few. Researchers and professionals like to dissect these topics.

For example, a study by Lülök and Sebestyén (2025) highlights that the prognosis, personalized financial advice and predictive analytics will be the next step in the application of artificial intelligence.

According to Deloitte, banks that effectively use AI in the software development lifecycle could save up to \$1.1 million per engineer by 2028, as AI helps speed up development processes, reduces human error, and thus brings products to market faster. This way, the financial institution can react much faster to its environment and customer needs (Lockard et al, 2025). The application of AI models in qualitative data processing opens up a new perspective in interview analysis, but also raises ethical and reliability issues (Sterczl & Csiszárík-Kocsir, 2025).

Artificial intelligence can already be linked to devices such as a 3D printer (Israr & Borsos, 2024), and even the gondola should not limit the possibilities.

I examined the theoretical background of artificial intelligence along different aspects. I broke down the aspects separately for easier transparency.

2.1 Ethical dilemmas

The appearance and highly efficient operation of ChatGPT has sparked a competitive battle. In addition to ChatGPT, many well-known companies' own creations have already been released (Amazon, Elon Musk, TikTok) and several Chinese versions. According to the almost obligatory criticism, the use of such solutions can lead to a serious decline in human abilities. The user uses his brain and the ability to read less and less often, and he wants to get information as quickly as possible (Hornýák, 2025). In this chapter, I will mention the ethical dilemmas that arise in connection with the application of AI solutions.

- Transparency and decision-making responsibility

If an AI system makes a decision (e.g. credit assessment), who takes responsibility for a possible error? In the questionnaire serving as the basis for the research, I also asked a question about this, the results of which are presented in the results chapter. Based on the articles on the internet, it can be said that several researchers and professionals are already dealing with these questions. According to Dr. Anna Molnár's (2025) article, for example, the development of artificial intelligence is very urgent to rethink transparency, data protection and legal regulations, especially from the point of view of ethical and social responsibility.

Transparency is a key issue in the use of AI, as we do not always know how the AI solution has achieved its result and what steps it has taken. Although there are already solutions, such as GPT-5, which describes what data it examines in various steps before displaying it, we cannot be sure what the result actually contains.

- Privacy and handling of personal data

AI systems process huge amounts of customer data. In the current digital age, data protection, transparency and fair behaviour are key (Müller & Kerényi, 2019). – How can this be ensured in an ethical manner? This is an extremely complex task that requires close cooperation from the social parties.

- Discrimination and prejudice

Algorithms can learn from distorted data patterns, which can lead to discriminatory decisions (e.g., based on ethnicity, gender, or geography). This is also an important question, and several studies deal with it. Based on this, it can be stated that it is essential to take ethical aspects and social justice into account when developing artificial intelligence applications (Mike, 2024).

2.2 Security challenges

The use of artificial intelligence not only creates new opportunities for financial institutions but also poses a number of security risks. The complexity and autonomy of AI systems pose challenges that go beyond traditional IT security issues. Cybersecurity threats, the rise of data manipulation and deepfake technologies, as well as the partial loss of human control, are all factors that affect social stability and the rule of law at a strategic level. The aim of this chapter is to present the security dilemmas that accompany the introduction and operation of AI systems, with special regard to cybersecurity, the authenticity of information and the risks arising from autonomous decision-making.

- Cybersecurity

AI systems can open up new attack surfaces, especially when it comes to automated decision-making. Regardless, several studies state that AI can play a key role in protecting systems, but only if it is used within the right regulatory and ethical frameworks (Bagó, 2023).

- Data Manipulation and Deepfake Threats

In the financial sector, the credibility of information is particularly sensitive, but it is important not only here, but also in other sectors. Deepfake technology and automated content production allow manipulation to be faster, more targeted and more difficult to detect. This is not only a technical but also a strategic challenge, especially in terms of national security and social stability (Benke, 2023).

- System independence and loss of control

If an AI system is too complex or self-contained, it can be difficult to take back control. According to the latest Hungarian studies, the autonomy of AI creates new types of risks, especially in the area of decision-making and responsibility. The application of AI in public administration can also result in significant efficiency gains, but at the same time it poses serious challenges in terms of human control, transparency and the rule of law (Rideg 2023).

2.3 Regulatory and compliance issues

The study by the National Bank of Hungary highlights that regulation often lags behind technological development, and the compliance assurance function plays a key role in maintaining ethical operation.

And the legal study of the University of Miskolc emphasizes the importance of data protection and social risks, especially in relation to generative AI systems.

The Artificial Intelligence Act is the first comprehensive, binding piece of legislation on artificial intelligence, adopted by the European Parliament in March 2024. It aims to ensure security and compliance with fundamental rights, while stimulating innovation and reinforcing Europe's leadership in AI (European Parliament, 2024).

In May 2020, the Hungarian government finalized Hungary's Artificial Intelligence Strategy, which covers the period 2020-2030. The aim of the public document is to put Hungary at the forefront of AI development, focusing on education, research and development, industrial applications and data management. The coordinating organization of the strategy is the AI Coalition, which brings together state actors, universities and tech companies into a bunch (Government of Hungary, 2020).

The Hungarian government has submitted a bill for the autumn parliamentary session starting on 22 September 2025, which includes, among other things, the establishment of the Artificial Intelligence Office. The main goal of the office will be the transposition and implementation of the European Union's AI Act in Hungary. Although the specific tasks of the Office are not yet known, according to the legislative plan, the Office could start operating in January 2026 based on a sufficient number of votes. (Lengyel, 2025).

Decree No. 1301/2024 (IX.30.) Government Decree provides for the implementation of the EU AI Act 2024 in Hungary. It establishes the Hungarian Artificial Intelligence Council, which issues guidelines and positions (Government of Hungary, 2024).

The background study of the Hungarian Parliament provides a comprehensive analysis of the technological types, benefits, dangers and international regulatory trends of AI, and highlights that there is no separate AI law in Hungary yet, but adaptation to the EU regulation is in progress (Szalay, 2023).

Hungary is actively striving to keep pace with European AI regulation and to build its own institutional framework for its application in Hungary. This has already been formulated in several studies by Hungarian experts (Domokos & Sajtos, 2024) The adoption of the AI Act not only creates legal compliance, but also an opportunity for the country to become a competitive player in the field of AI developments. The strategy papers, the planned office and council, and the legislative preparations all show Hungary's long-term commitment to the safe, ethical and innovative use of AI. In addition, it can be said that there is a great need for the use of AI to take place within a regular framework. We are talking about a technology that dances on very thin ice. We know that AI devices often hallucinate and are wrong. Critical thinking is required to use it in the right way. Young people are at the greatest risk, as they are not always able to decide whether the information they receive is correct or even real. AI tools are known to be based on probabilistic data, and this may be the fault. However, the error must be recognized. It is important to emphasize that the Adatbias characteristic of AI also refers to the importance of critical thinking, as AI learns from data that may already contain bias.

3. Material and method

As part of the research, I conducted a questionnaire survey in Google Forms, which was based on a series of 20 questions, which included both open and closed questions, Likert scale questions. The questionnaire was sent to people over the age of 18 via social media platforms and email as a personal address. Using the snowball method, I asked for the questionnaire to be forwarded. The questionnaire was also published on the social media platforms of various start-up companies dealing with artificial intelligence.

For the analysis, I used Microsoft Excel reports and charts and statistical methods.

4. Outcomes

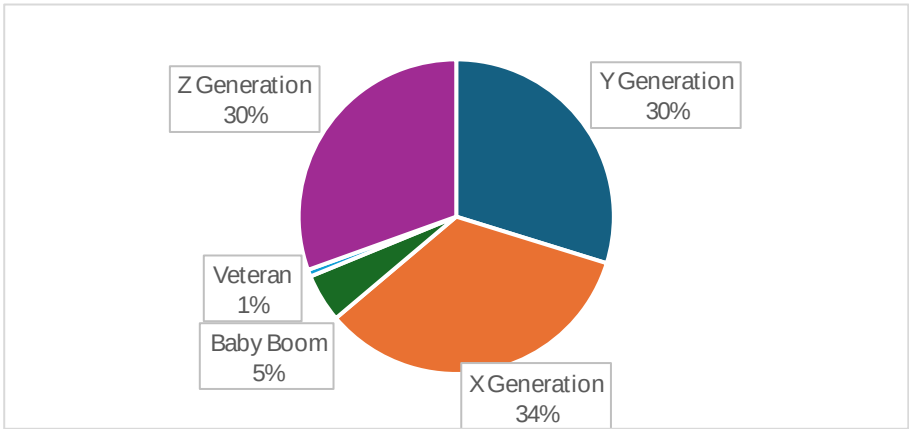
The questionnaire consisting of 20 questions received 254 responses in one month. In terms of demographics, 68.1% of respondents were women, 30.5% were men and 1.4% did not want to answer this question.

The classifications of generations have an interdisciplinary origin: they mix demographic, sociological, psychological and technological theories, using several official generational theories (Erdélyi, 2023).

Generation Name	Year of birth interval	Features at a glance
Veteran generation	1945 and before	War and post-war generation, respectful of tradition
Baby Boom generation	1946–1964	Stability, welfare society, loyalty
Generation X	1965–1980	Technological transition, individualism
Millennials	1981–1996	Digital revolution, flexibility, self-realization
Generation Z	1997–2012	Digital natives, visual culture
Generation Alpha	After 2013	They grow up with AI and smart devices

The distribution of respondents shows the following picture:

Figure 1: Distribution by generations



(Source: Author's own research, 2025, n = 254)

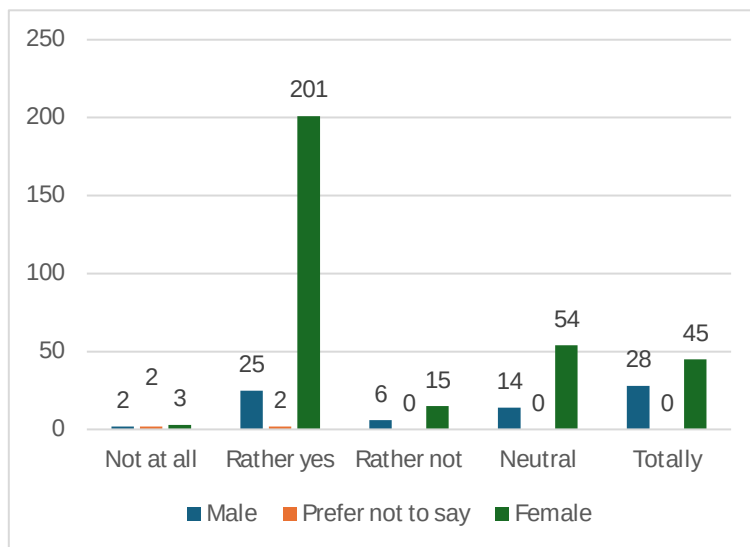
The distribution of the respondents' educational attainment shows that those with secondary and tertiary education completed the questionnaire the most. The reason for this may be that I used a lot of technical terms in the questionnaire, and it

became clear from some of the feedback that a simpler wording is recommended for further research (1 elementary, 82 intermediate, 166 advanced and 5 Phd).

The next step is to present the empirical data obtained during the research.

In terms of confidence in AI, the breakdown is as follows. It is clear that female respondents are much more confident in the use of digital technologies.

Figure 2: Gender distribution of confidence in AI



(Source: Author's own research, 2025, n = 254)

Figure 3: Correlation matrix of emotional responses

	Doubt	Curiosity	Confidence	Neutral	Rejection
Doubt	1	0,019	0,008	0,032	-0,076
Curiosity	0,019	1	0,034	0,012	-0,059
Confidence	0,008	0,034	1	0,021	-0,042
Neutral	0,032	0,012	0,021	1	-0,063
Rejection	-0,076	-0,059	-0,042	-0,063	1

(Source: Author's own research, 2025, n = 254)

For the correlation matrix, the questionnaire What feelings do you feel when you have to communicate with an AI system during banking? I provided the answers

to your question with binary code. After that, I created the matrix using the Data Analysis function of Microsoft Excel, and then the heat map with conditional formatting.

In the interpretation of the matrix, it can be said that the correlation values are very weak, typically ranging between 0.0 and 0.03. Rejection shows a weak negative relationship with all other emotions, especially Doubt ($r = -0.076$), which may indicate that those who reject AI do not necessarily doubt it – rather, they reject it outright. There is a slight positive relationship between Curiosity and Trust ($r = 0.034$), which is weaker than expected, but it may still indicate that curiosity is not always associated with trust.

Main observations:

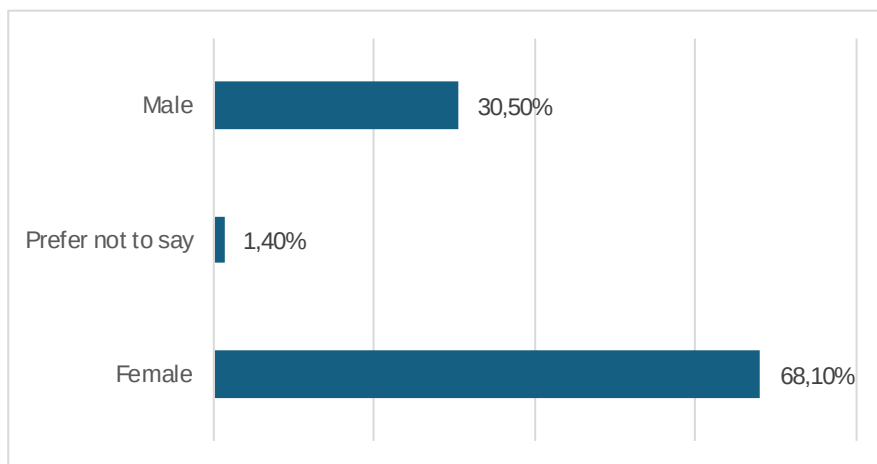
- A weak negative relationship between rejection and doubt can be observed ($r = -0.076$). This suggests that respondents who reject AI do not necessarily doubt the technology – rather, they strongly reject its application. This attitude does not stem from uncertainty, but from deeper distrust or value-based resistance.
- There is a slight positive relationship between curiosity and trust ($r = 0.034$), which, although weak, still indicates that interest in technology goes hand in hand with trust to some extent. At the same time, a low value suggests that curiosity doesn't guarantee trust – interested customers may still be cautious or critical.
- Neutral attitude has a weak relationship with all dimensions (e.g., neutral ↔ trust: $r = 0.021$), which indicates that neutrality is not closely associated with either positive or negative emotional responses. This group may be the most influential through communication and education.
- Rejection has a negative correlation with all other dimensions, especially curiosity ($r = -0.059$) and neutrality ($r = -0.063$). This confirms that the rejection attitude is strongly separate from other forms of emotional response and can be interpreted as an independent, closed emotional position.

The color-coded heatmap display of the matrix (green – positive, red – negative, yellow – neutral) helps interpretation, especially in a presentation environment. Through visual highlighting, it becomes immediately apparent that the emotion of rejection is related in the opposite direction to almost all other attitudes.

The weak correlations between emotional attitudes suggest that AI-related customer perception does not move on a linear scale but is much more segmented and complex. This confirms that customer types require a differentiated approach to AI development – especially in the areas of ethical communication, data protection and trust building.

In the area of confidentiality in cybersecurity issues, the following analysis can be observed in terms of gender ratio.

Figure 4: Gender distribution of confidentiality on cybersecurity issues



(Source: Author's own research, 2025, n = 254)

According to the chart, female respondents are much more concerned about cybersecurity issues in AI applications. In the questionnaire, respondents had the opportunity to comment on this on a scale of 1 to 5. The values were assigned to the genders and then aggregated.

Word cloud

The word cloud below was formed from the answers received to the free word question of the questionnaire. In terms of the size of the words, the term "non-human" is outstanding, which suggests that a significant number of responses are not yet able to accept AI as the technology of the future. The question was about what proposals they would have for the ethical operation of AI in the banking sector.

Figure 5: Word cloud on AI proposals



(Source: Author's own research, 2025, n = 254)

Based on the cluster analysis of the free word answers of the questionnaire, three main types of customers can be distinguished according to their relationship to banking communication with AI: technology-friendly trust builders, those who need critical control, and distrustful rejecters.

The factor analysis was based on variables based on attitudes and emotions (e.g. trust, curiosity, rejection, data protection, need for human control, experiences with AI).

1. Digital Trust Builders

- Typical factor weights: high trust, curiosity, positive experience with AI systems, low rejection.
- Demographic characteristics: typically, from generations Y and Z, with higher education, digital banking is common
- Attitudes:
 - Accepting AI decisions without human intervention
 - They are open to new technologies
 - Less concerned about data security

2. Responsible supervisors

- Typical factor weights: high doubt, moderate curiosity, strong need for human review, medium trust
- Demographics: mainly Generation X, middle managers, frequent bank users
- Attitudes:
 - They accept AI, but only under human control
 - Transparency and auditability are important to them
 - Risk-sensitive

3. Technology skeptics

- Typical factor weights: high rejection, low trust and curiosity, and strong privacy concerns
- Demographics: typically, Baby Boom and Generation X, less frequent use of digital banking
- Attitudes:
 - They reject AI as a decision-maker
 - They are very concerned about discrimination and data management
 - They prefer a human administrator

In the cluster analysis, emotional attitudes (trust, curiosity, rejection, neutrality and doubt), responses to AI-related statements (data protection, human control, efficiency), and experience and preference were included with AI-based systems.

5. Conclusion

Based on the information obtained during the research and the available literature, I made a literature comparison. From this I have established the following.

Regarding the acceptance of AI, I used the TAM/UTAUT models as a basis, which determine whether someone accepts a certain technology along factors such as perceived utility or perceived ease of use. And according to the improved version, performance expectation, effort expectation, social influence and facilitating conditions. However, during the analysis of the questionnaire, we can observe that the emotional dimensions (Doubt, Curiosity, Trust, Neutral, Reject) do not follow each other in a straight, predictable order in the process of technology acceptance.

On the topic of transparency and responsibility, Molnár (2025) emphasizes the importance and urgency of these in his study, but respondents prefer human control.

Data protection: it can be seen that respondents are not interested in legal requirements and regulations, and in many cases they may not even be aware that they exist. Worry is more emotionally charged.

The EU AI Act and the National Bank of Hungary consider discrimination risks to be important, but respondents only feel this in general, but do not perceive it.

The use of AI in financial institutions is therefore not only a technological or legal issue, but also has emotional, trust, and social dimensions. Customers do not react in the same way: some are open, some are cautious, and some are dismissive. Based on the comparison with the literature, the research confirms international trends, but also brings new aspects, especially in the field of emotional attitudes and the dynamics of trust.

Topic	Parallel	Variance
Embracing AI	TAM/UTAUT models – attitudes influence acceptance	Emotional dimensions (e.g., rejection) do not fit linearly
Transparency and accountability	Anna Molnár (2025) – urges transparency	Respondents do not always require technical explanations, preferring human control
Data protection	The GDPR and AI Act emphasize data security	Respondents' concerns are often emotional, not legal or technical
Discrimination risks	EU AI Act and Hungarian National Bank studies highlight	Respondents do not always perceive it concretely, but rather it appears as a general fear

Regarding the acceptance of AI, I used the TAM/UTAUT models as a basis, which determine whether someone accepts a certain technology along factors such as perceived utility or perceived ease of use. And according to the improved version, performance expectation, effort expectation, social influence and facilitating conditions. However, during the analysis of the questionnaire, we can observe that the emotional dimensions (Doubt, Curiosity, Trust, Neutral, Reject)

do not follow each other in a straight, predictable order in the process of technology acceptance.

On the topic of transparency and responsibility, Molnár (2025) emphasizes the importance and urgency of these in his study, but respondents prefer human control.

Data protection: it can be seen that respondents are not interested in legal requirements and regulations, and in many cases they may not even be aware that they exist. Worry is more emotionally charged.

The EU AI Act and the National Bank of Hungary consider discrimination risks to be important, but respondents only feel this in general, but do not perceive it.

The use of AI in financial institutions is therefore not only a technological or legal issue, but also has emotional, trust, and social dimensions. Customers do not react in the same way: some are open, some are cautious, and some are dismissive. Based on the comparison with the literature, the research confirms international trends, but also brings new aspects, especially in the field of emotional attitudes and the dynamics of trust.

References

1. Government of Hungary. (2025, June 22) Retrieved from: <https://hirlevel.egov.hu/2025/06/22/jon-a-magyar-mesterseges-intelligencia-hivatal/> Retrieved 2025.08.14.
2. Government of Hungary. (2024, September 30). Government Decision No. 1301/2024 (IX.30.) on the measures necessary for the implementation of the Regulation of the European Parliament and of the Council on Artificial Intelligence. National Collection of Legislation. Retrieved from: <https://njt.hu/jogszabaly/2024-1301-30-22> Downloaded: 2025.08.14
3. Szalay, K. (2023). Artificial intelligence, regulatory directions. Office of the National Assembly – Members' Information Service. Retrieved from <https://www.parlament.hu/documents/d/guest/mesterseges-intelligencia> Retrieved 2025.08.14.
4. Government of Hungary. (2020). Hungary's Artificial Intelligence Strategy. Retrieved from <https://cdn.kormany.hu/uploads/document/6/67/676/676186555d8df2b1408982bb6ce81c643d5fa4ab.pdf> Retrieved 2025.08.16.
5. Müller, J., & Kerényi, Á. (2019). A bizalom és etika igénye a digitális korszakban: Napfény és árnyék a Fintech világában Credit Institution Review, 18(4), 5–34. Retrieved from <https://doi.org/10.25201/HSZ.18.4.534>
6. Mucsinyi-Horváth, A. (2025). Mesterséges intelligencia: segítő kéz vagy időzített bomba? *Magyar Nemzeti Bank Tanulmányok*. Retrieved from <https://www.mnb.hu/letoltes/25-08-12-mucsinyi-horvath-alexandra->

[mesterseges-intelligencia-segito-kez-vagy-idozített-bomba.pdf](#)

Downloaded: 2025.09.18

7. Lengyel, T. (2025, June 17). Ha késve is, de érkezik az új állami szerv, a Magyar Mesterséges Intelligencia Hivatal. *HVG*. Retrieved from https://hvg.hu/gazdasag/20250617_Ha-kesve-is-de-erkezik-az-uj-allami-szerv-a-Magyar-Mesterseges-Intelligencia-Hivatal-ebx Retrieved 12.10.2025.
8. Lülök, G., & Sebestyén, Z. (2025). A mesterséges intelligencia legújabb alkalmazási trendjei a bankszektorban. *Hitelintézeti Szemle*, 24(2), 47–74. DOI: 10.25201/HSZ.24.2.47
9. Schenk, T. (n.d.). *A mesterséges intelligencia átalakítja a pénzügyi szektort: új korszak elé néznek a bankok is*. Deloitte. Retrieved from <https://www.deloitte.com/hu/hu/services/consulting/perspectives/a-mesterseges-intelligencia-atalakitja-a-penzugyi-szektor-uj-korszak-ele-neznek-a-bankok-is.html> Retrieved 12.10.2025.
10. Lockard, R., Srinivas, V., & Chauhan, A. (2025, October 12). AI can help banks unleash a new era of software engineering productivity. Deloitte Insights. Retrieved from <https://www.deloitte.com/us/en/insights/industry/financial-services/financial-services-industry-predictions.html#ai-can-help-banks-unleash> Retrieved 2025.10.12
11. Hornyák, Sz. (2025, July). Tanulmány: a mesterséges intelligencia felforgatja a pénzügyi szektort. *Világgazdaság*. Retrieved from <https://www.vg.hu/nemzetkozi-gazdasag/2025/07/mesterseges-intelligencia-penzugy-tanulmany> Retrieved 12.10.2025.
12. Molnár, A. (2025). A mesterséges intelligencia etikai kihívásai: adatvédelem, átláthatóság és szabályozás a technológiai fejlődés korában. *Jogászvilág*. Retrieved from <https://jogaszvilag.hu/a-jovo-jogasza-a-mesterseges-intelligencia-etikai-kihivasai-adatvedelem-atlathatosag-es-szabalyozas-a-technologiai-fejlodes-koraban/> Retrieved 2025.11.01.
13. Mike, N. (2024). Előítélet, diszkrimináció és gazdasági egyenlőtlenségek – A mesterséges intelligencia etikai kihívásai. *Máltai Tanulmányok*. Retrieved from <https://maltaitanulmanyok.hu/magazin/elotelet-diszkriminacio-es-gazdasagi-egyenlotlensegek-a-mesterseges-intelligencia-etikai-kihivasai/> Retrieved:2025.11.01.
14. Bagó, P. (2023). Kiberbiztonság és Mesterséges Intelligencia Kapcsolata. *Gazdaság és Pénzügy*, 10(2), 196–221. Retrieved from <https://doi.org/10.33926/GP2023.2.5> Retrieved 2025.11.01.
15. Benke, B. P. (2023). A megtévesztés új korszaka: A mesterséges intelligencia fejlődésének hatása a dezinformációs kampányokra. *Haditechnika*, 57(6), 26–32. <https://doi.org/10.23713/HT.57.6.06> Retrieved 01.11.2025.
16. Rideg, G. (2023). A mesterséges intelligencia és a közigazgatás – Gondolatok a mesterséges intelligencia szabályozás kockázatalapú megközelítéséről a gyakorlatban, kihívások és lehetőségek.

- Közigazgatástudomány*, 3(2), 160–173.
<https://doi.org/10.54200/kt.v3i2.65> Retrieved 01.11.2025.
17. Erdélyi, D. (2023). Generációk harca – X, Y, Z, Alfa. OecoBright – Oeconomus Gazdaságkutató Alapítvány. Retrieved from <https://www.oeconomus.hu/oecobright/generaciok-harca-x-y-z-alfa/> Retrieved 2025.11.01.
18. Domokos, A., & Sajtos, P. (2024). Mesterséges intelligencia a pénzügyi szektorban – Innováció és kockázatok. *Hitelintézeti Szemle*, 23(1), 155–166.
19. Sterczl, G., & Csiszárík-Kocsir, Á. (2025). Comparative analysis of AI models \u2012 Using AI-supported qualitative data analysis for interview analysis. *Acta Polytechnica Hungarica*, 22(7), Issue 159. Retrieved from https://acta.uni-obuda.hu/Sterczl_CsiszarikKocsir_159.pdf Retrieved 19.11.2025.
20. Israr, J., & Borsos, D. (2024). Artificial intelligence and machine learning in metal additive manufacturing: An overview. In *XL. Kandó Conference Proceedings*. Óbudai Egyetem, Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar.

Blind source separation methods used in functional brain imaging

Zoltán Géza Tóth

Obuda University Kandó Kálmán Faculty of Electrical Engineering

Institute of Electronics and Communication Systems

Department of Telecommunication

1084, Budapest

Tavaszmező utca 15-17.

toth.zoltan@kvk.uni-obuda.hu

Summary – In my presentation, I will introduce the data analysis methods used in functional brain imaging. I will review the pre-processing steps used to improve the signal-to-noise ratio. I will describe the basics of blind source separation (BSS) methods— independent component analysis (ICA) and extended spatial decorrelation (ESD)—and how these methods can be applied in modern functional brain imaging, such as optical imaging of internal (within human body) signals or functional magnetic resonance imaging.

1 Introduction

In my previous work, I presented the physiological knowledge related to my research and described the structure of the completed laboratory. I assume that the reader has read my previous work before reading this material, so I will not repeat the terms I explained in that paper.

In this document, I will discuss the processing of measured image data. As a first step, I will describe the data structure of the video files obtained during the measurement series and their pre-processing.

In order to understand the detailed analysis following the pre-processing, I will review the various BSS methods, with focusing on their advantages and disadvantages. I present the initial results of my research through a few examples.

2 Image data structure and pre-processing

The amount of data recorded during a trial depends on the ROI. Each trial has a raw file that stores the 12-bit camera signal in 16 bits (MATLAB cannot handle 12-bit variables). The size of these raw files usually exceeds 100 MB (a 500 x 500 pixel, 10-second video file at a camera speed of 28 frames per second is $500 \times 500 \times 10 \times 28 \times 2 = 140,000,000$ bytes, i.e. 133.5 MB). An experiment usually consists of 30 trials, which means a total data volume of over 3 GB. A complete series of experiments requires approximately 200-300 GB of storage capacity. It can be concluded from the above that the files recorded during the measurements require pre-processing, which reduces their size.

Pre-processing is also necessary because the useful information content of these files is less than 0.1 per cent. This is because physiological artefacts (heartbeat, breathing and 0.1 Hz V signal) cause an order of magnitude greater haemodynamic changes than the component to be examined. [1]

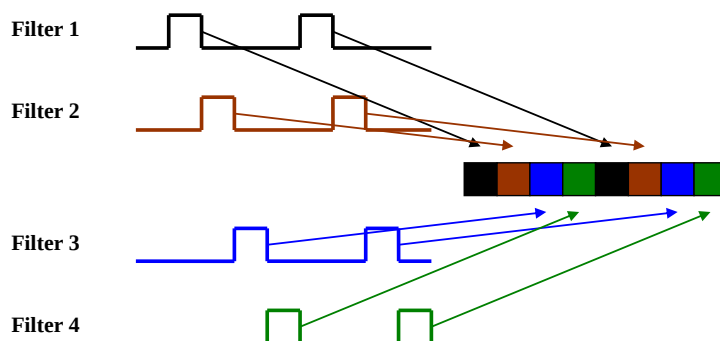


Figure 1. The temporal nature of individual light sources and the location of the corresponding images in the raw file.

Figure 1 illustrates the position of different monochrome illuminated images within the raw file. The first step in pre-processing is to separate the individual monochrome components and average them into trials. This results in four MATLAB files of approximately 100 MB each. Using a camera with a speed of 28 images per second, each filter will have 7 images per second. Calculated with a trial length of 11 seconds, this will result in 77 images per filter.

In the next step, the data for each full second is averaged per filter, which reduces their size by a further seventh. The averaged data per second is called a bin, and the process itself is called binning. Thus, at the end of the binning process, 4×11 bins are created. The final step of pre-processing is called first frame analysis, which essentially involves extracting the image before stimulation (first second) from the other images, so that the resulting bin, which is now one less, will

contain difference signals that make it easier to track the changes we are looking for. As shown in Figure 2, at the end of the process, we obtain 10 difference images averaged over 1 second per filter.

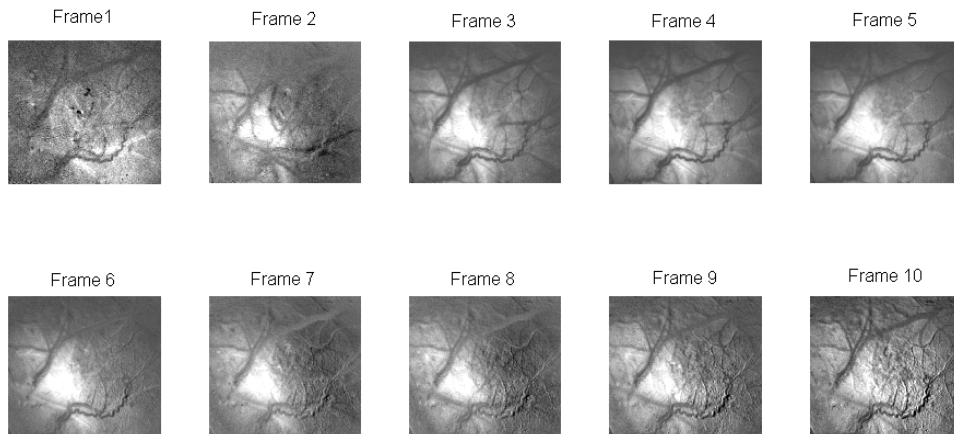


Figure 2 Difference images averaged per second with a 577 nm filter. Here, the appearance and subsequent fading of the activated area is clearly visible.

Before describing the further processing steps, I will present the related mathematical background.

3 BSS procedures

To understand BSS procedures, the cocktail party problem shown in Figure 3 is often cited as an example. Given the recorded signals $x_1(t)$ and $x_2(t)$, only a special statistical procedure (BSS) can be used to reproduce the original sources ($s_1(t)$, $s_2(t)$) with high accuracy.

Cocktail party problem

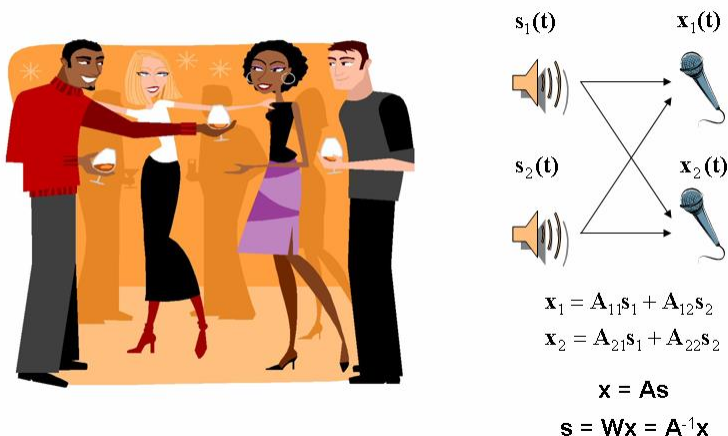


Figure 3. The cocktail party problem. Two talking partners are the two signal sources, $s_1(t)$ and $s_2(t)$, or $\mathbf{s}$ in vector form. Two microphones record the data, $x_1(t)$ and $x_2(t)$, or $\mathbf{x}$ in vector form. In this case, $\mathbf{x}$ will be a mixture of $\mathbf{s}$, $\mathbf{x} = \mathbf{A}\mathbf{s}$, where $\mathbf{A}$ is unknown, so the original sources cannot be reproduced directly from the recorded signal without a special statistical procedure.

3.1 Principal Component Analysis:

Principal component analysis (PCA) is commonly used to find the original source vector. PCA is now part of major statistical software packages such as SPSS. This procedure can calculate a set of signals from the recorded data that are statistically uncorrelated. In other words, the PCA procedure searches for a linear transformation matrix that can be used to determine the elements of the signal set with the greatest variance or standard deviation. [2] However, in some cases, uncorrelatedness is not a sufficient condition. Figure 4 shows a two-variable joint distribution that is not orthogonal. In this case, only the ICA method can correctly determine the eigenvalues and eigenvectors.

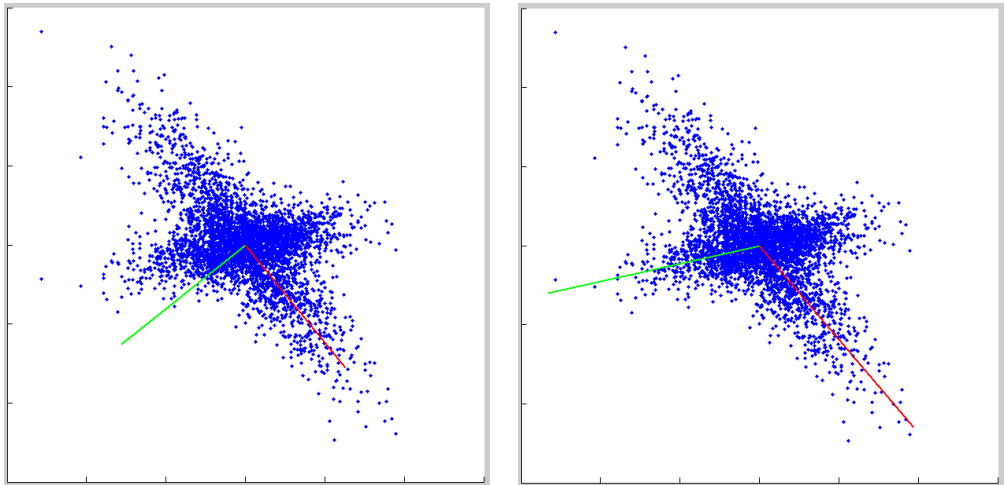


Figure 4 PCA cannot calculate the correct eigenvalues and eigenvectors because the joint distribution of the data is not orthogonal. The figure on the left shows the result of the PCA method. PCA correctly determines the first principal component (red line), but incorrectly calculates the second component (green line). In contrast, the components determined by ICA, shown in the figure on the right, are correct

However, PCA is also a useful tool in this case, because it can be used to transform the data set into a coordinate system in which the direction of one of the basis vectors is given by the first eigenvector. PCA can therefore be used as a pre-processing method for independent component analysis (ICA). [1][3][4]

3.2 Independent component analysis:

The goal of ICA is to determine the inverse mixing matrix $\mathbf{W} = \mathbf{A}^{-1}$. With the help of this matrix, the independent sources $\mathbf{s}' = \mathbf{W}\mathbf{x}$ can then be restored with high accuracy from their noisy mixture. If the noise can be ignored, the inverse mixing matrix can be written in the following form: $\mathbf{W} = \mathbf{\Lambda P A}^{-1}$, where $\mathbf{P}$ is a permutation matrix and $\mathbf{\Lambda}$ is a diagonal matrix containing the unknown variances of the sources. [4][5][6]

Sphering is the name given to the pre-processing step in which the data set is transformed into a new coordinate system using the PCA method. This greatly simplifies the determination of the inverse mixing matrix. This procedure transforms the data set so that the components obtained have a mean of zero and a covariance of unity. [1][5][7]

The independence of the components can be determined by their deviation from the Gaussian distribution. Assuming that the source signals are not normally distributed, which is true for random signals, the distribution of their mixture is

more normal than the distribution of any of the original signals (central limit theorem), so it is sufficient to find the inverse mixing matrix for which the recovered sources are most non-normally distributed. The various ICA methods are basically based on the following two algorithms:

- Infomax. This method is based on determining the entropy of the data set, since a probability variable that deviates more from the normal distribution has greater entropy and greater information content. Negentropy, the deviation from the entropy of a normally distributed variable, is often used, as its value is zero for normal distribution and otherwise a non-negative number. This method is therefore based on finding the maximum negentropy. Thus, it is sufficient to find the inverse mixing matrix for which the recovered sources are most non-normally distributed. The various ICA methods are basically based on the following two algorithms:
- Maximising kurtosis. Kurtosis can be calculated from the second and fourth moments of the probability variable. Its value is zero in the case of a normal distribution. If the kurtosis is negative, the distribution is called sub-Gaussian; if it is positive, it is called super-Gaussian. The distribution function of super-Gaussian signals is more peaked in the middle and has 'heavier tails' at the edges than the distribution function of normally distributed variables.

There are conditions for using ICA, and unfortunately, there are also disadvantages:

- Only one of the original source signals could have a normal distribution.
- The number of the original source signals must be less than or equal to the number of measured signals.
- ICA is a computationally intensive and slow process. The so-called FastICA algorithms, developed to increase speed, do not calculate kurtosis, but use approximation functions instead.
- The order of the results obtained is unknown, so the individual independent components can only be identified by some special attributes.
- As a result of sphering, the average of the independent components is also zero and their covariance is unity, i.e. the expected range of the component amplitude must be known for rescaling. Figure 5 shows an example of this. If we know that the source variables are wav files, then the resulting components can be rescaled to a value between ± 1 which is typical for wav files, otherwise rescaling cannot be performed.

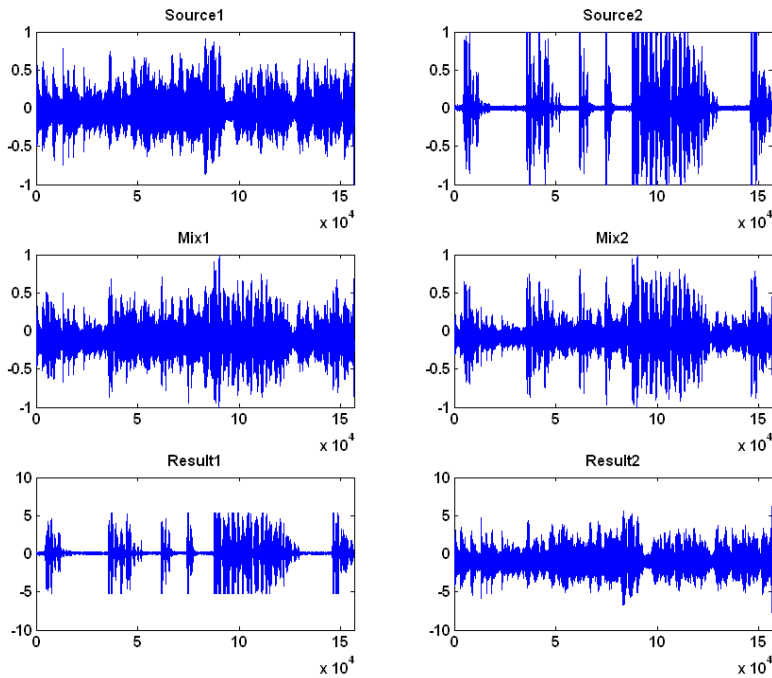


Figure 5 Mix1 and Mix2 are two wav files, a mixture of Source1 and Source2. The two components restored with ICA are Result1 and Result2.

3.3 Extended Spatial Decorrelation:

Molgedey and Schuster developed another possible method for determining independent signals. They called their method timed delay decorrelation. The essence of this method is that it delays a signal with a zero mean value and unit variance (if the signal is not like this, it must be transformed first). The delayed signal is analysed, and the resulting transformation procedure is then applied to the undelayed signal. This procedure requires much less computation and therefore takes much less time than the ICA procedure. [8]

A German research group modified this procedure to allow image signals to be analysed. The procedure was named extended spatial decorrelation (ESD). Instead of creating a new data series with a time shift, the additional image series is created by shifting the images horizontally and vertically. [1][7]

The following conditions must be met in order to use the ESD method:

- The spatial distribution of the original sources must be uniform.
- Among the original sources, the covariance must be zero, i.e. the sources must be uncorrelated.

- The original source and its spatially shifted version must also be uncorrelated.
- The autocovariance of each source must be different.

According to Schiessl, the ESD method is sufficiently robust to calculate independent components even if their sources are slightly dependent on each other and their variation is very small ($<0.1\%$). [1][9]

3.4 Application of BSS algorithms:

ICA was originally developed for analysing neuroscience data, such as EEG, but today it is increasingly used in other areas of life. Examples of such applications include:

- Analysing economic data and finding hidden correlations within it.
- Image noise filtering.
- In telecommunications, for example in mobile communications, separating one's own signal from the signals of other users causing interference using Code-Division Multiple Access (CDMA).

However, the ICA method is still most commonly used today for analysing neurological data. Following this theoretical overview, I will return to describing the processing of my own measured results.

4. Further analysis of the pre-processed data

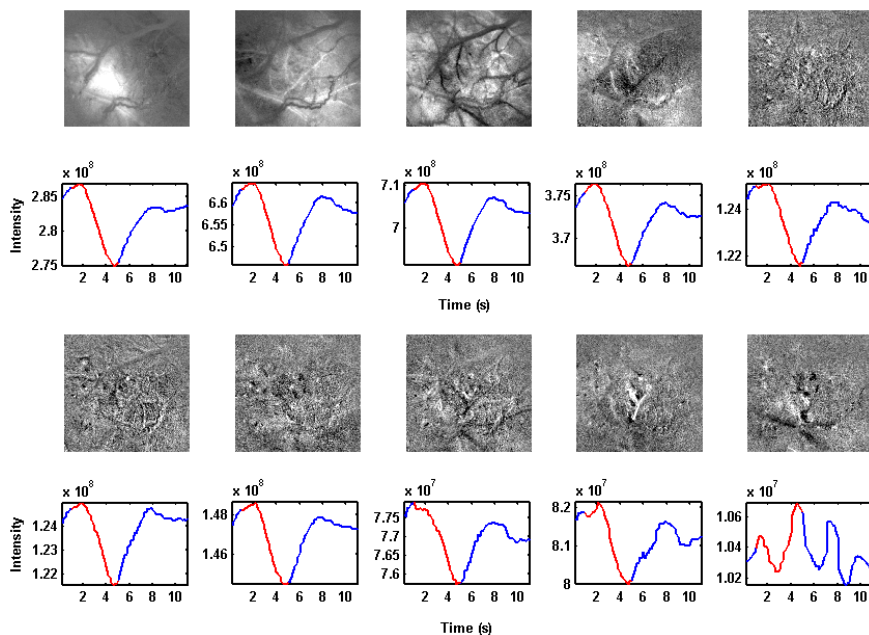


Figure 6. Independent image components calculated from difference signals and their temporal changes. The first image shows the active area, the next two images show the veins and arteries, while the others essentially contain only noise. On the time functions, the part drawn in red shows the time of stimulation.

To generate spatially independent components, the 10 difference image signals calculated earlier must be analysed based on their spatiality rather than their temporality. This means that the image elements that make up each image must be sequentially concatenated, and the resulting vectors, whose number will correspond to the number of bins, must be considered as a measured element. It follows from the above that this method can be used to produce a number of independent image components equal to the number of bins. Figure 6 shows the independent image components of the difference signals previously shown in Figure 2. Let the values of the frames averaged over the original trials, decomposed into column vectors, form the S matrix. The number of elements in the column vectors is $x \cdot y$, where x and y are the number of rows and columns in the image. Let the value of the current independent image component decomposed into row vectors be r , whose number of elements is also $x \cdot y$. Below each component, you can see its time domain evolution, which I calculated using the $r \cdot S$ product.

The time domain behaviour can be further refined if the calculation is performed not on the entire image, but only on its activated area. Figure 7 shows the GUI I developed, where, in addition to the ESD component showing the activated area for each filter, only the time domain signal calculated for a small part of the activated area is visible.

Figure 7 shows that the signals obtained in the time domain (especially the 700 nm component) are noisy. Further improvement in the signal-to-noise ratio can be achieved by averaging the signals obtained in the time domain using the above method over several series of experiments. Of course, averaging can only be performed on the same stimulated whisker and the same stimulating signal shape. Figure 8 shows the time domain signals averaged per whisker and per signal shape for a series of experiments performed on several subjects under different lighting conditions. The figure clearly shows that in the case of sinusoidal stimulation, the response is much noisier, with oscillation in some cases. This was to be expected, as the energy content of a square wave signal with the same amplitude is greater. Approached from another angle, the harmonic content of the square wave causes a stronger haemodynamic response (recall the logarithmic relationship between spike frequency and stimulation frequency described in the previous document).

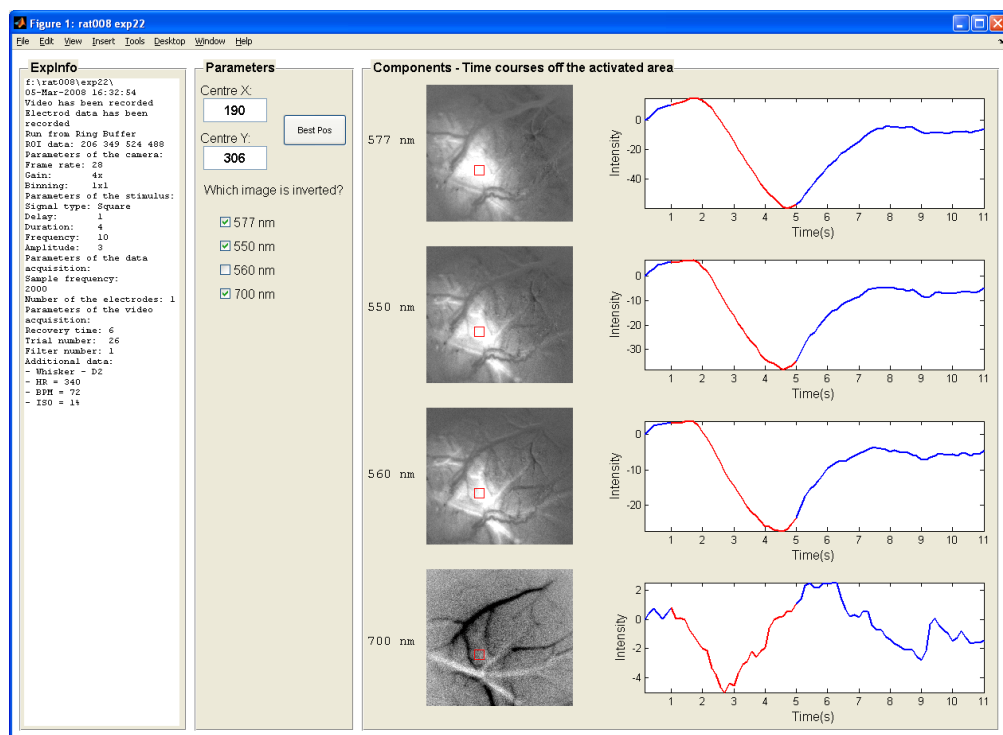


Figure 7 GUI shows the activated areas for an experiment. The box on the left side of the GUI shows the parameters of the experiment. In the Parameters panel, you can set which part of the active area the

programme should use to calculate the signal in the time range. The selected area is marked with a small red square. The position of the square can also be adjusted by clicking on the top image (577 nm). As I mentioned earlier, the ESD component is not scaled, so it may happen that the ESD calculates an inverted image (the black and white areas are swapped). The images can therefore be inverted by clicking on the appropriate checkbox.

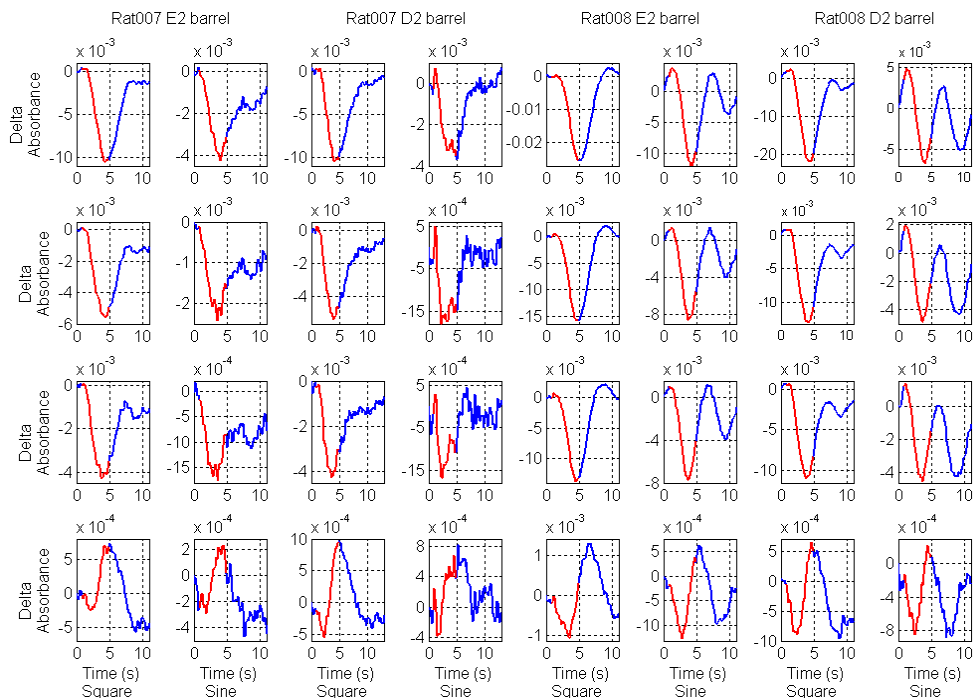


Figure 8 Signal shapes averaged over time ranges per subject, per stimulated moustache and per stimulus signal shape. The vertical axes of the figures show the $(I_t - I_0)/I_0$ delta absorbance value, where I_0 is the intensity value obtained at $t=0$ and I_t is the intensity value obtained at time t .

Summary

The results of the analyses performed so far are consistent with the results of previous studies. [10][11] I drew Figure 9 to verify the calculation of the activated areas. When stimulating different moustaches, the activated areas coincide with the barrels obtained by tissue staining.

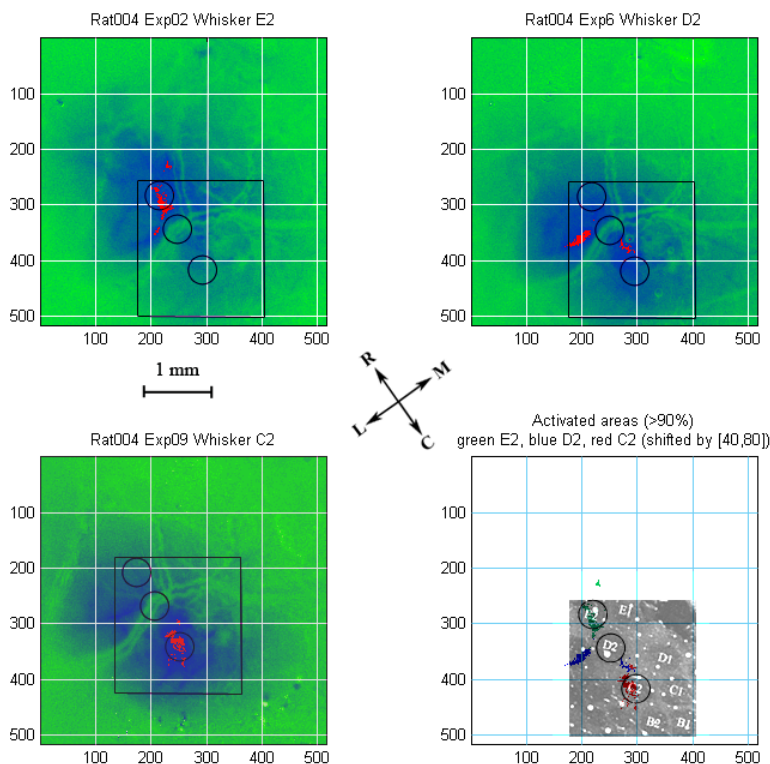


Figure 9. In the first three figures, the areas highlighted in red indicate the activated part (areas with an intensity exceeding 90%). In the second image, the activated areas drawn on the stained section almost coincide with the barrels highlighted with black circles. The results of histology (tissue staining) are indicated by black outlines in the other three images. The position of the image corresponding to the C2 moustache differs from the others because the camera moved. The degree of displacement is [40,80] pixels, which I calculated based on a well-defined point (the junction of the blood vessels).

The data in this document contains twenty series of measurements. In the calculations performed so far, I have only analysed the response to individual light components, which only gives a rough approximation of the changes in the main physiological characteristics described in the previous document. This analysis therefore needs to be refined further by calculating the components corresponding to the actual physiological processes from the recorded spectral data and then analysing the data obtained in the manner outlined above.

Acknowledgement

I would like to take this opportunity to thank Dr. Zsolt Temesvári, György Molnár, Dr. Tibor Wühl and Ildikó Grega for organising this conference, my supervisor Dr. Ingo Schiessl and my advisor Dr. John Gigg for their help at the

University of Manchester, the head of OE KVK EKRI, Dr. Péter Varga, for the support received from the Institute, the UK Biotechnology and Biological Sciences Research Council (BBSRC) for the three-year scholarship they awarded me.

Last but not least, I would like to express my special thanks to my wife, Dr. Gabriella Juhász, for her help in understanding the physiological parts, and to my family for putting up with my keyboarding late into the night.

References

- [1] Schiessl, I., Stetter, M., Mayhew, J. E., McLoughlin, N., Lund, J. S., and Obermayer, K. (). "Blind signal separation from optical imaging recordings with extended spatial decorrelation." *IEEE Trans Biomed Eng*, 47(5), 573-7. 2000
- [2] Stone, J. V. Independent Component Analysis: A Tutorial Introduction, *London: Bradford Book*. 2004
- [3] Hyvarinen, A. Independent Component Analysis: A Tutorial [internet] (Updated April 1999) Available at: http://cis.legacy.ics.tkk.fi/aapo/papers/IJCNN99_tutorialweb/IJCNN99_tutorial3.html [accessed 10 October 2025] 2000
- [4] Hyvarinen, A., Karhunen, J., and Oja, E. Independent Component Analysis, *New York: John Wiley & Sons Inc*. 2001
- [5] Comon, P. "Independent component analysis, A new concept?" *Signal Processing*, 36, 287-314. 1992
- [6] Hyvarinen, A. "Fast and robust fixed-point algorithms for independent component analysis." *IEEE Trans Neural Netw*, 10(3), 626-34. 1999
- [7] Stetter, M., Schiessl, I., Otto, T., Sengpiel, F., Hubener, M., Bonhoeffer, T., and Obermayer, K. "Principal component analysis and blind separation of sources for optical imaging of intrinsic signals." *Neuroimage*, 11(5 Pt 1), 482-90. 2000
- [8] Molgedey, L., and Schuster, H. G. "Separation of a mixture of independent signals using time delayed correlations." *Phys Rev Lett*, 72(23), 3634-3637. 1994
- [9] Schiessl, I. Blind Source Separation Algorithms for the Analysis of Optical Imaging Experiments, *Technischen Universität Berlin*, Berlin. 2001
- [10] Nemoto, M., Nomura, Y., Sato, C., Tamura, M., Houkin, K., Koyanagi, I., and Abe, H. "Analysis of optical signals evoked by peripheral nerve stimulation in rat somatosensory cortex: dynamic changes in hemoglobin concentration and oxygenation." *J Cereb Blood Flow Metab*, 19(3), 246-59. 1999

- [11] Sheth, S. A., Nemoto, M., Guiou, M. W., Walker, M. A., and Toga, A. W. "Spatiotemporal evolution of functional hemodynamic changes and their relationship to neuronal activity." *J Cereb Blood Flow Metab*, 25(7), 830-41. 2005

Integrating satellite imagery and Machine Learning for infrastructure risk forecasting in Honduras

Gefer Haciel Hernandez Romero

Gefer Haciel Hernandez Romero, Óbuda Egyetem, Bécsi út 94-96, 1034, Budapest, Hungary, gefer.hernandez@stud.uni-obuda.hu

Abstract: Honduras and neighboring countries are known vulnerable territories to extreme weathers in terms of rainfalls and irregular areas with dense vegetaion, these factors along with the scarce access to studies, lack of economic resources and tabulated data makes it of particular interest to develop a method that helps assess risk infrastructure in areas of difficult access. This study integrates satellite imagery, AI and machine learning into training a model that helps establish an index of failure for given regions in Honduras, based on weather features and terrain characteristics that include vegetation indexes compared to real data about outages in a given period of time. With $AUC = 0.857$ this study shows a promising correlation between irregularity of terrain, temperature among other factors and power outages, however its Cross-validation AUC for this model 0.638 ± 0.229 highlights the need for further research with different training methods, more samples and potentially more features from the data sources.

Keywords: Machine learning; AI; Honduras; Power outage

1 Introduction

1.1 Background and problem

Honduras is a latin american country located in Central America, in an area that is well known to be vulnerable to extreme weather conditions that include prolonged precipitations and hurricanes [1, 2], including extreme temperatures. All these features combined with limited resources, makes the area particularly prone to outages in services that can't be addressed right away, affecting the economy and the quality of life of its inhabitants. This study is intended to serve as a basis for power outage analysis based on weather and terrain data that can help the authorities and any interested parties to address areas with potential for power outages before they happen, and this analysis can be extended to many other

hazardous events in terms of infrastructure that can potentially pose a risk on the lives of local communities. For countries like Honduras or any other entity involved, this information would allow a more efficient allocation of resources that would result in less outages, and in general a better quality of life.

In Honduras, nearly 60% of outages correspond to scheduled maintenance reports versus the total gross number of outages, representing around 70% of the time offline, leaving a gap of 40% of outages that are unexpected which account for around 30% of the time offline of the electric grid [3, 4]. This highlights the importance of determining a helper predictor which could serve the interests of the industry in terms of better planning and the government for better allocation of resources.

1.2 Data sources

In order to conduct the study and develop a trained model, real outages data was needed, which was obtained from the official website of the National Company of Electrical Energy (ENEE, acronym in Spanish) of Honduras with the National Dispatch Center (CND, acronym in Spanish) [3]. Reports are available to be downloaded from the public, and this data was compared against certain features that were obtained from freely available data from the mission Sentinel-2A and Sentinel 2B with Copernicus for terrain data, which provides up to 10 meters in spatial resolution [5]. It allows the extration of certain bands that can help determine the physical composition of the terrain, which include: moisture, urban infrastructure, vegetation density. Elevations are also important in the sense that they allow us to determine the irregularities of the terrain as these could also represent a contributing factor for a failure index, and this feature was extracted from the Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), a jointly project that creates a digital topographic map of the Earth's land surface [6]. Additionally, weather data was used as well, and ERA5 from ECMWF reanalysis, altogether with TerraClimate was the source of this information. Google Earth Engine was the platform used to gather and download all the data from the different services already mentioned.

1.3 Scope

The model presented in this study was trained using features from Honduras specifically for the power outages index determination, with completely freely available data for academic purposes. The power lines of study was the medium voltage lines of 34.5 kV. Due to the similarities with neighboring regions, the same study could be conducted in surrounding areas with potentially similar results, and potentially for different magnitudes of voltages, or even different types of infrastructure that are under the stress of weather or terrain features and

that could be subject to outages. Additionally, this type of study has potential to be used on any country that be interested in establishing risk indexes for transportation network or to evaluate any other service subject to different conditions too.

2 Literature review

2.1 Remote Sensing for infrastructure monitoring

Risk forecasting through remote sensing has been used already by extracting data from the Sentinel-2 mission along with additional imagery such as from Landsat and MODIS, where different bands are used to determine reflectance indexes that are associated to the humidity of the soil [5, 7]. Sentinel-2a and Landsat8 are „the most advanced satellites with freely available data for long-term high-frequency remote sensing applications” [8]. Some of the bands that can be collected are shown in the following table.

Table 1. Characteristics of ESA Sentinel-2A and 2B [9]

		Sentinel-2A		Sentinel-2B	
Spatial Resolution (m)	Bands	Central wavelength (nm)	Bandwidth (nm)	Central Wavelength (nm)	Bandwidth (nm)
10	Band 2—Blue	492.4	66	492.1	66
	Band 3—Green	559.8	36	559	36
	Band 4—Red	664.6	31	664.9	31
	Band 8—NIR	832.8	106	832.9	106

A major example in the implementation of remote sensing for infrastructure risk and monitoring of satellite data to monitor and evaluate the September 2019 floods in Eastern Spain from the 9th to the 3th, causing severe floodings in populated areas, where four different prediction systems were available to the forecasters in the actual, real time management for the storm: „two regional models for the short range (HARMONIE-AROME and γ -SREPS) and the HRES-IFS and the ENS-IFS ensemble for the medium range” [10], where the systems accurately forecasted the severe floodings episodes and the affected areas.

2.2 Machine Learning models for this study

For this study data was tabulated, and due to the low amount of samples available, models such as XGBoost are more appropriate. Other models such as eXtreme,

Random Forest were used as well and evaluated against each other to determine the best model for our data, using the AUC (Area under the curve) parameter.

In general, AUC can be described as follows, in terms of the False Positive Rate (FPR) or also known as alfa (α), or the probability that the algorithm classifies a negative instance as positive:

$$\alpha = P(FP) = \frac{FP}{FP + TN} \quad (1)$$

Where:

FP is the number of False Positives and TN is the number of True Negatives. Alfa is, in simpler wording, „out of all the actual negative cases, what fraction of them is incorrect?”.

3 Methodology

3.1 Data acquisition and pre-processing

3.1.1 Primary raw data and pre-processing for outages

The data used to train the model was collected from January to May of 2025, and it corresponded to the circuit CYG L325, which is a primary line of medium-low voltage line of 34.5 kV and a valid point of reference is the main substation from which it derives, it corresponds to, in decimal coordinates, in format latitude, longitude: 14.446609, -87.636291. The available data contained the starting and ending date and time of the documented outages and names of areas, not the coordinates of the device that was triggered. Therefore, an algorithm that would request such coordinates from AI services was created, and for this study Google Geocoding API was used and the exported KML files were visually inspected and corrected. Therefore an algorithm that helped determine the closest point to the substation that also belonged to the circuit CYG L325 was chosen, simulating a close point to the failure point. In this occasion, Microsoft Excel VBA¹⁵ was used to develop and run such script.

¹⁵ VBA is Visual Basic for Applications. Microsoft Excel is a registered trademark of Microsoft Corporation.

3.1.2 Primary raw data and pre-processing for outages

The use of a multi-sensor approach was necessary to consider as many bands as the sample allowed it. With a buffer or radius of 500 meters around the specified point of failure, considered for outage and non-outage, the information was extracted from three separate sensors:

Optical images: Mission Sentinel-2A from Copernicus. used to identify the type of vegetation or features of the soil. For each point and period, there was a consideration of ± 45 days in case that in the previous 7 days there was no usable imagery found (prolonged cloudy regions).

Topographic data: DEM model: Stands for Digital Elevation Model, with a resolution of 30 meters, it obtains the elevation in absolute values above the sea level (meters) and slope of the place.

Meteorological Data: Parameters are extracted from a meteorological standpoint to study a potential correlation between the occurrence of meteorological adverse events and the disruption of power service derived from failure of structures, using ERA5. Alternatively, Global Forecast System (GLS) was used when ERA5 data was not available.

Data was created of non-outages following the same locations but in different dates and times that were not considered outages.

3.2 Features selected

Based on the amount of data, the following features were selected: B11_mean, B11_max, B12_stdDev, B2_stdDev, B4_max, NDBI_mean, NBR_max, NDWI_stdDev, NDWI_max, temperature_max_max, temperature_min_max and temperature_min_stdDev.

3.3 Results and analysis

A comparison was established between five models and the one that had the highest AUC value was the chosen one. With the highest AUC-ROC score of 0.8571, XGBoost was selected as the best model. However, from cross-validation we obtain a AUC-Test value of 0.6375 (± 0.229) which would be a more realistic number for this model, based on the limited dataset ($n=39$). The model shows some discriminative ability, but more training data is required to improve the stability of it. The following Table 2 shows the performance of the model for the test dataset.

The model achieved a test accuracy of 70%. Even when the AUC score is high, the precision 0.5 highlights a tendency to false positives, given that half of the

predicted values were false alarms. The recall of 0.667 for outages demonstrates that the model identified 66.7% of the actual outage events, which is reasonably valuable for risk management.

The significant difference between AUC and cross validation AUC represents a weak predictive power in some scenarios, which is compatible with the precision being 0.5, therefore there is a high dependency upon the dataset used for training, and in the future more training data would be advisable.

Metric	Value	Interpretation
AUC-ROC	0.857	Good discriminative ability
Accuracy	0.7	70% overall correct classification
Precision	0.5	50% of predicted outages were correct
Recall	0.667	67% of actual outages detected
F1-Score	0.571	Balanced measure of precision and recall
Cross-validation AUC	0.638 ± 0.229	Moderate performance with high variability

Table 2. XGBoost Model Performance on Test Dataset.

B12_stdDev accounts for the most influential factor in predicting outages accounting for 20.4%, which is the variability of the SWIR-2 band, and it encloses features such as terrain heterogeneity and moisture patterns. Extreme temperatures follow accounting for 17.2% of predictive power.

Summary

Honduras is located in a region prone to extreme and uncertain weather conditions, where irregular terrain is predominant. Due to lack of resources and difficult access to locations, outages are of common occurrence, causing disruptions in the economy and local communities. Therefore, this study aims to establishing a risk index model to improve the allocation of resources, helping transition from a reactive model to a more proactive, smart one, using freely available data, Machine Learning and AI to automate and build such index. This model is a proof of concept that can be extended to many other regions to assess risk infrastructure.

Acknowledgments

This work was supported by Miss Borsos Döníz & Mr. Ady László, for whom no words could make any justice on my gratitude to their continuous support. I thank Obuda University for providing the opportunity. Tudományos Diákköri Konferencián

References

- [1] N. CEPAL, "Evaluación de los efectos e impactos causados por la tormenta tropical Eta y el huracán Iota en Honduras," 2021.
- [2] D. H. V. Rojas and S. M. R. Corea, "Desastres y sufrimiento: Temporada de huracanes en Colombia y Honduras," *Revista de Estudios Latinoamericanos sobre Reducción del Riesgo de Desastres REDER*, vol. 9, no. 1, pp. 97-110, 2025.
- [3] C. N. d. Despacho. "Informe de fallas." Centro Nacional de Despacho - ENEE. <https://cnd.enee.hn/informe-de-fallas/> (accessed 2025, 2025).
- [4] U. t. d. C. d. Distribución. "Mantenimientos Programados." ENEE. <https://www.eneeutcd.hn/es/mantenimientos-programados-NTC249> (accessed November 5, 2025).
- [5] F. Spoto et al., "Overview of sentinel-2," in 2012 IEEE international geoscience and remote sensing symposium, 2012: IEEE, pp. 1707-1710.
- [6] T. G. Farr et al., "The shuttle radar topography mission," *Reviews of geophysics*, vol. 45, no. 2, 2007.
- [7] G. Misra, F. Cawkwell, and A. Wingler, "Status of phenological research using Sentinel-2 data: A review," *Remote Sensing*, vol. 12, no. 17, p. 2760, 2020.
- [8] T. Zhang, J. Su, C. Liu, W.-H. Chen, H. Liu, and G. Liu, "Band selection in sentinel-2 satellite for agriculture applications," in 2017 23rd international conference on automation and computing (ICAC), 2017: IEEE, pp. 1-6.
- [9] D. Phiri, M. Simwanda, S. Salekin, V. R. Nyirenda, Y. Murayama, and M. Ranagalage, "Sentinel-2 data for land cover/use mapping: A review," *Remote sensing*, vol. 12, no. 14, p. 2291, 2020.
- [10] F. J. Tapiador et al., "The September 2019 floods in Spain: An example of the utility of satellite data for the analysis of extreme hydrometeorological events," *Atmospheric Research*, vol. 257, p. 105588, 2021/08/10/ 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2021.105588>.

Akusztikus-hangforrás lokalizátor digitális jelfeldolgozással

Dobos Kende János, Braun Ferenc, Kackstädter Péter, Volk János, Molnár Zsolt

Dobos Kende János, hallgató [Óbudai Egyetem, Tavaszmező utca 15-17., 1084, Budapest, Magyarország] doboskende@gmail.com

Braun Ferenc, HUN-REN Energiatudományi Kutatóközpont, Konkoly-Thege Miklós út 29-33, 1121, Budapest, Magyarország, brown.ferenc@ek.hun-ren.hu

Kackstädter Péter, Szent György Hang- és Filmművészeti Technikum, Lenhossék u. 24-28, 1096, Budapest, Magyarország, kackstadter.peter@broadcast.hu

Volk János, HUN-REN Energiatudományi Kutatóközpont, Konkoly-Thege Miklós út 29-33, 1121, Budapest, Magyarország, volk.janos@ek.hun-ren.hu

Molnár Zsolt, Óbudai Egyetem, Bécsi út 96/B, 1034, Budapest, Magyarország, molnar.zsolt@kvk.uni-obuda.hu

Absztrakt: Cikkünk azt a témát járja körül, hogy hogyan lehet egy tetszőleges hangforrás irányát meghatározni, mindezt digitális jelfeldolgozással. Modellt alkottunk a jelenségről, szimulációkat végeztünk, majd létrehoztunk egy rendszert, amely valós időben képes a hangforrás irányát kiszámolni és kimutatni. Bemutatjuk egy blokkdiagramon keresztül, hogy hogyan áll össze ez a rendszer, milyen részekegységekből áll és milyen szempontok alapján raktuk össze ezeket az egységeket. Szó esik még egy kiértékelésről is, amely egy mérés során készített hanganyagból számított eredményeket vet össze a hangforrás pozícióját mért eszköz eredményeivel. A jövőbeli fejlesztési lehetőségekről is ejtünk még pár mondatot

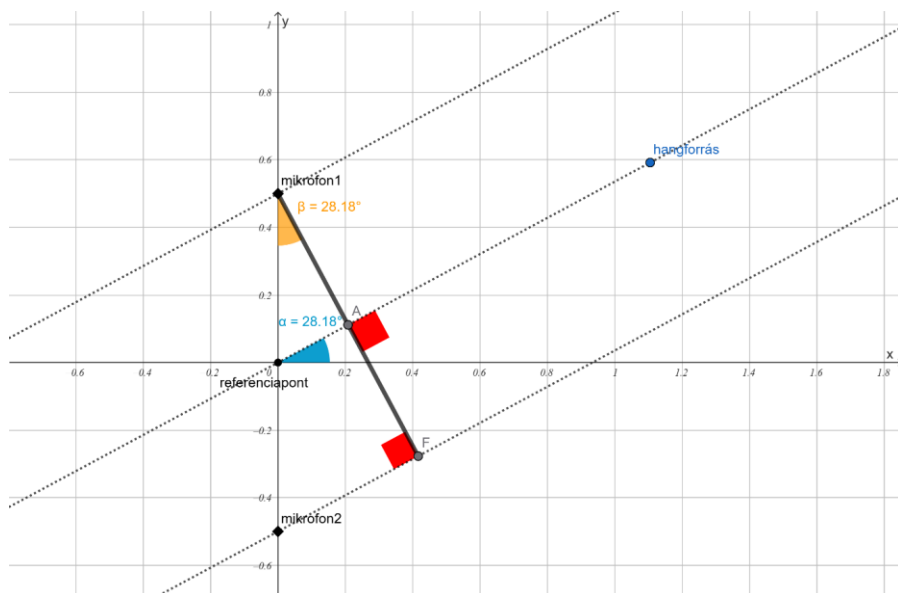
Kulcsszavak: digitális jelfeldolgozás, hangforrás lokalizáció, keresztkorreláció, fft, tdoa

1 Módszerek

1.1 Matematikai módszerek

1.1.1 Hang terjedése síkhullámként

Az ideális hangforrásunk hangjának hullámfrontja mindenképp gömbfelületet alkot, azonban a távolság növekedésével ennek a gömbnek a sugara egyre nagyobb lesz, egyre kevésbé érzékelhető a görbülete és síkfelületnek tekinthetjük. Elsősorban síkban vizsgáljuk a jelenséget.



36. ábra: síkhullám terjedési irányszögének visszafejtése

Ez az ábra, amelyet GeoGebrában készítettem, azt szemlélteti, hogy a síkfelületként kezelt hullám a mikrofonokba érkezési idő különbségéből, hogyan tudunk következtetni a hangforrás irányára, azaz az α szögre. A szaggatott vonalak a hullám terjedési irányát mutatják és mivel síkhullámról beszélünk, ezek a vonalak párhuzamosak. Ilyenkor a terjedési irányra merőleges hullámfront a fekete vastag szakasz lesz. Ez mutatja azon pontok halmazát a síkban, amelyek a síkhullám hullámfrontját képezik abban az időpillanatban, amikor a hang az 1.

mikrofonba érkezik. Ilyenkor létrejön egy útkülönbség, amely az $sd=d(F; \text{mikrofon2})$ szakaszként írható le.

Matematikailag adódik, hogy az α és β szögek merőleges szárú szögek, így azok egyenlők. Ilyenkor a keresett irány, mint főiránytól való szögeltérés, a következőképp számítható:

$$\alpha = \sin^{-1} \frac{sd}{d_{\text{mikrofon}}} \quad (2)$$

ahol d_{mikrofon} a két mikrofon közti távolság.

Mivel azonban az sd útkülönbséget nem tudjuk közvetlenül mérni, át kell számolni a mért td időkülönbséget a hangsebességgel való osztással, így:

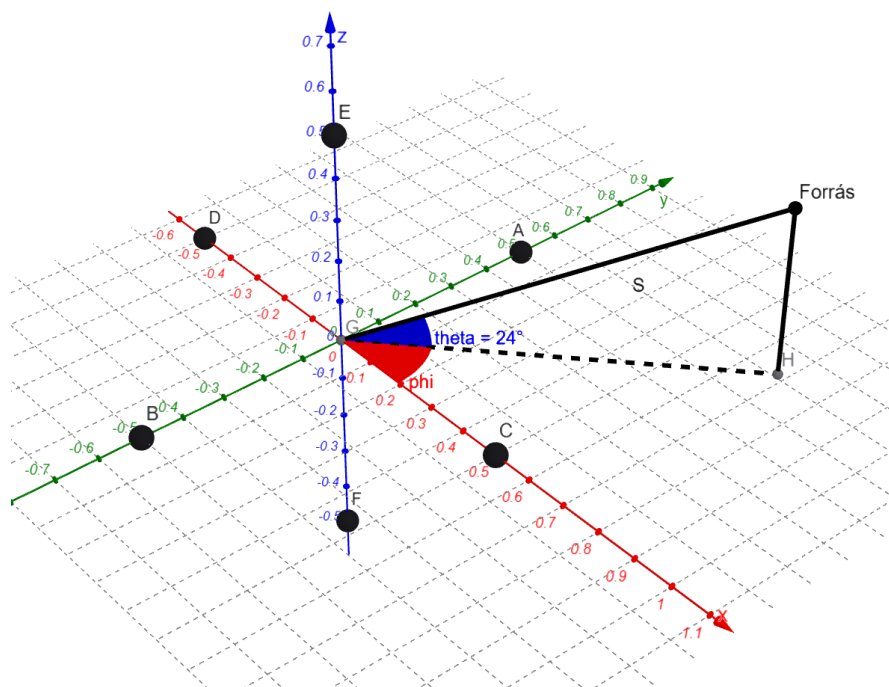
$$\alpha = \sin^{-1} \frac{\frac{td}{v_{\text{hang}}}}{d_{\text{mikrofon}}} \quad (2)$$

Ez az ún- TDOA (Time Difference Of Arrival) módszer [5], amelynek lényege, hogy a beérkezési időkülönbségekből következtetünk a hangforrás irányára, csak úgy, mint az emberi irányhallás esetén [2].

Ahhoz, hogy pontosabb irányt tudjunk számítani, érdemes további 2-2 mikrofont alkalmazni a tér további 2 dimenziójára.

1.1.2 Irányszögek számítása

A térbeli irányszögek számítási módszerét szemlélteti a következő ábra:



37. ábra: irányszögek szemléltetése

A fekete gömbök helyén a 3 pár mikrofon található, melyek közt időkülönbséget mérünk páronként. Ha az x-tengelyt tekintjük főiránynak, akkor a síkbeli- vagy vízszintes szögeltérést a phi (piros) szöggel ábrázolhatjuk, a magasságbeli- vagy függőleges szögeltérést phi-hez képest pedig a theta (kék) szög ábrázolja. A következőkben sokszor fogok ezen paraméterekre ily néven hivatkozni. A következő számítással kaphatjuk meg a hangforrás irányát a 3 tengelyre vonatkoztatott időkülönbségek ismeretében:

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{v_{hang} \times \Delta t_y}{v_{hang} \times \Delta t_x} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{\Delta t_y}{\Delta t_x} \right), \quad (3)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{v_{hang} \times \Delta t_z}{\sqrt{(v_{hang} \times \Delta t_x)^2 + (v_{hang} \times \Delta t_y)^2}} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{\Delta t_z}{\sqrt{\Delta t_x^2 + \Delta t_y^2}} \right), \quad (4)$$

ahol Δt_x , Δt_y , Δt_z az x, y és z tengelyen mért időkülönbségek, v_{hang} pedig a hang terjedési sebessége, mely kiesik a képletből.

1.1.3 Időkülönbség meghatározás

A két mikrofon kimeneti jelei közt számított keresztkorrelációs függvény számításával meg tudjuk állapítani a mikrofonok közt fellépő időkülönbség mértékét.

A keresztkorrelációs függvény a következőképpen adható meg:

$$W_{xy}(\tau) = \lim_{T_v \rightarrow \infty} \frac{1}{2 \times T_v} \int_{-T_v}^{T_v} x(t - \tau) \times y(t) dt, \quad (5)$$

ahol T_v a vizsgált időtartomány ideje, $x(t)$ és $y(t)$ pedig a két mikrofon bemenete [1].

Ez a függvény -1 és 1 közti értékeket vehet fel, a határokat beleértve. Ha a függvény pozitív értéket vesz fel, akkor a két jel közti hasonlóság -azaz korreláció- is pozitív. Ha negatív a függvény által felvett érték, akkor negatív ez a hasonlóság, azaz az egyik jel polaritásának fordításakor lenne pozitív a korreláció. Mivel azonban, ha a két mikrofonba érkező hang, 0 s időkülönbség esetén azonos polaritású villamos jelet ad a kimenetén, elég a legnagyobb szélsőérték helyett a keresztkorrelációs időfüggvény globális maximumát megkeresni. Ahol ez az időfüggvény a legnagyobb értéket veszi fel, az lesz a két mikrofonhoz tartozó időkülönbség értéke:

$$\Delta t = \operatorname{argmax} (W_{xy}(\tau)). \quad (6)$$

Szimulált, digitális jelekkel is vizsgáltuk az esetet. Az egyik bemeneti, sweep jelünk frekvenciája 20 Hz-től lineárisan nő 20 kHz-ig, mindezt 10 ms időtartam alatt, 48kHz-es mintavétellel és 32 bites lebegőpontos bitmélységgel. Az egyik jel ez, a másik pedig ugyanez, csak -1 ms-mal eltolva időben. Az eredményeket egy Pythonban általam írt kóddal hoztam létre és rajzoltam ki:



38. ábra: sweep jel keresztkorrelációs függvénye

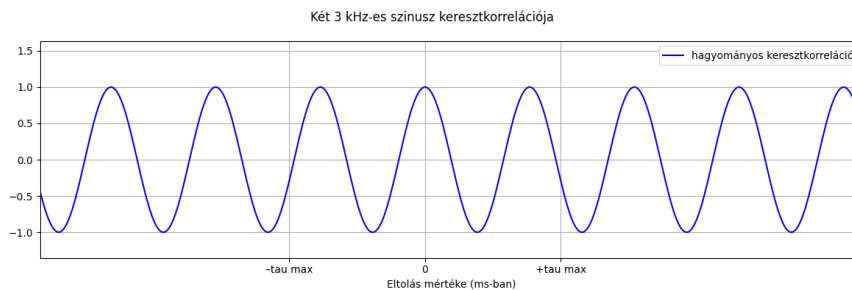
Jól kiadja a függvény a két jel közti időkülönbséget.

Nem lehet a mikrofon távolságnál nagyobb hullámhosszú jel esetén időkülönbséget mérni, ez állítás bizonyításaként 3 kHz-es szinuszos jelet is vizsgáltunk:



39. ábra: két 3 KHz-es jel keresztkorrelációja

Közelebbről:



40. ábra: két 3 KHz-es jel keresztkorrelációja kinagyítva

3 kHz hullámhossza :

$$\lambda = \frac{343 \frac{m}{s}}{3 \text{ kHz}} \approx 11 \text{ cm} . \quad (7)$$

Két egymástól 15 cm-re lévő mikrofon közt a legnagyobb lehetséges időkülönbség:

$$\tau_{max} = \frac{0.15 \text{ m}}{343 \frac{m}{s}} \approx 43 \text{ us} . \quad (8)$$

Ez a bizonyos τ_{max} fel is van tüntetve a vízszintes tengelyen. Periodikus a keresztkorrelációs függvény és ezen a $\pm\tau_{max}$ -os tartományon több helyen is 1-et

vesz fel a függvény. Egy lineáris fáziskarakterisztikájú aluláteresztő szűrő, aminek a törésponti frekvenciájának hullámhossza a két mikrofon távolsága, jól ki tudja küszöbölni a magas frekvenciák átlapolódásából keletkező hibás értékeket.

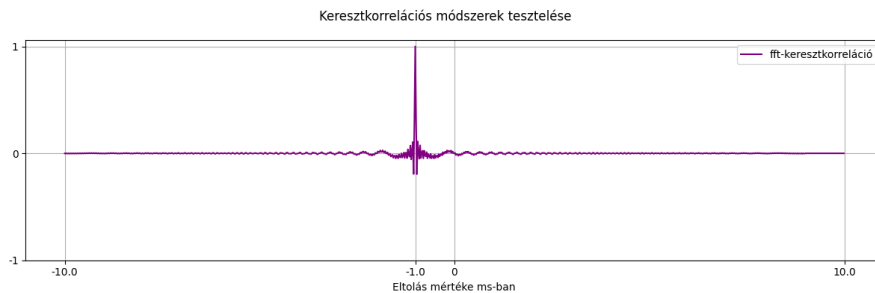
Ha valós időben akarjuk ezt megkapni, esetleg hosszabb jeleken, a számítási erőforrások használatának optimalizálásakor sokkal jobban járunk, ha a Wiener-Hincsin tételt alkalmazzuk [1]:

$$x(f) = \mathcal{F}\{x(t)\} \text{ és } y(f) = \mathcal{F}\{y(t)\} \quad (9)$$

esetén:

$$W_{xy}(\tau) = \mathcal{F}^{-1}\{x(f) \times y^*(f)\}. \quad (10)$$

Ennek tükrében, ha a két bemeneti jelen FFT-t végzünk, majd az első jel spektrumát összeszorozzuk a második jel spektrumának komplex konjugáltjával, akkor megkapjuk a két jel keresztspektrumát, azaz a keresztkorrelációs időfüggvény spektrumát. Ezen a keresztspektrumon IFFT-t végezve megkapjuk a két jelen végzett keresztkorrelációs időfüggvényt, ez a módszer az úgynevezett generalizált keresztkorreláció [6]. A korábban szimulált sweep jeleken elvégezve az FFT-alapú keresztkorrelációt a következő eredményt kapjuk:

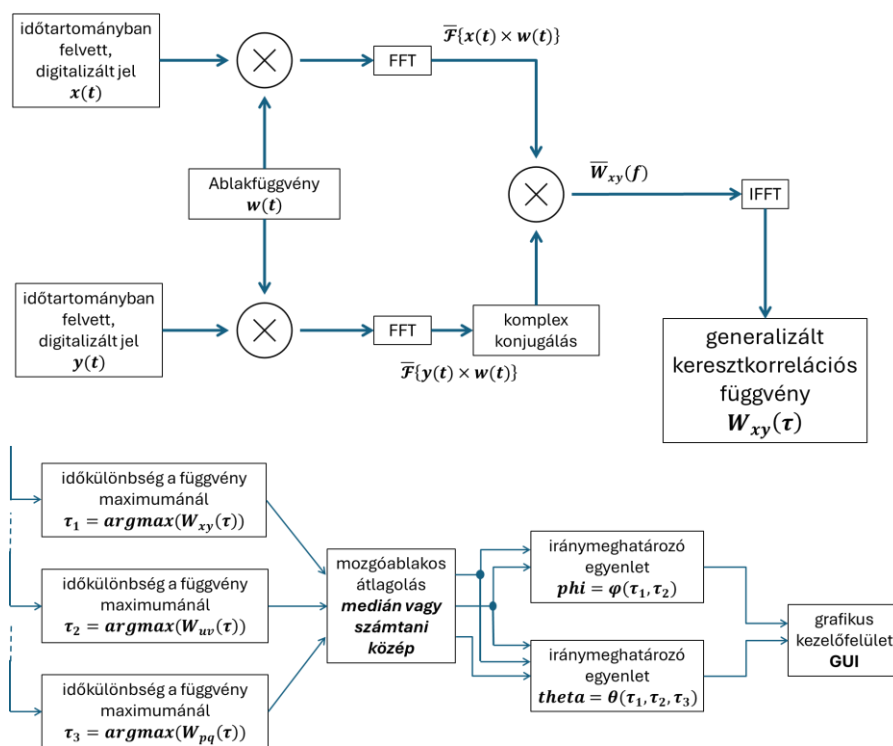


41. ábra: FFT-alapú keresztkorrelációs függvény

Az eredmény tökéletesen ugyanaz, a kulcs azonban a lefutásának idejében van. Az hagyományos keresztkorreláció futásideje **6,6 s**, míg az FFT-vel végzett verzió esetén **16 ms** volt csak.

1.1.4 Az algoritmus blokkdiagramja

A korábban leírtak alapján készítettem egy blokkdiagramot, mely bemutatja az iránymeghatározó algoritmus működését, kiértékelés módszertanát. Az egyetlen újdonság, hogy a mért időkülönbségeket átlagoljuk a mérés során, ezzel csökkentve a véletlen hiba hatását.



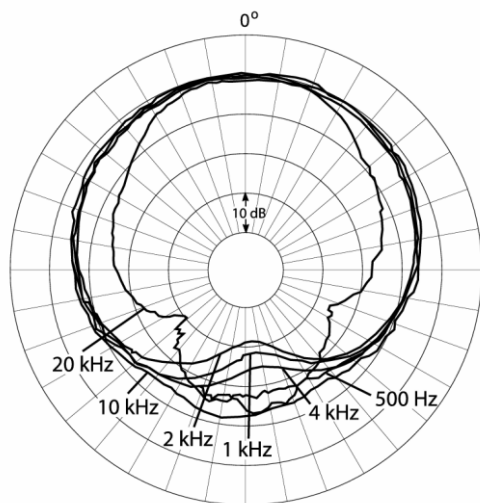
42. ábra: a mérőrendszer blokkdiagramja

1.2 Kísérleti módszerek

1.2.1 Mikrofonkarakterisztika

Minden irányból ugyanakkora érzékenységgel kell vennünk a hangot, ezért a legcélszerűbb megoldásnak gömbkarakterisztikájú mikrofon használata számít.

A kísérletek során használt DPA 4053 gömbkarakterisztikájú mikrofon polárdiagramja [4]:



43. ábra: DPA 4053 mikrofon irányérzékenységi karakterisztikája

1.2.2 mérés a Pannónia Filmstúdióban

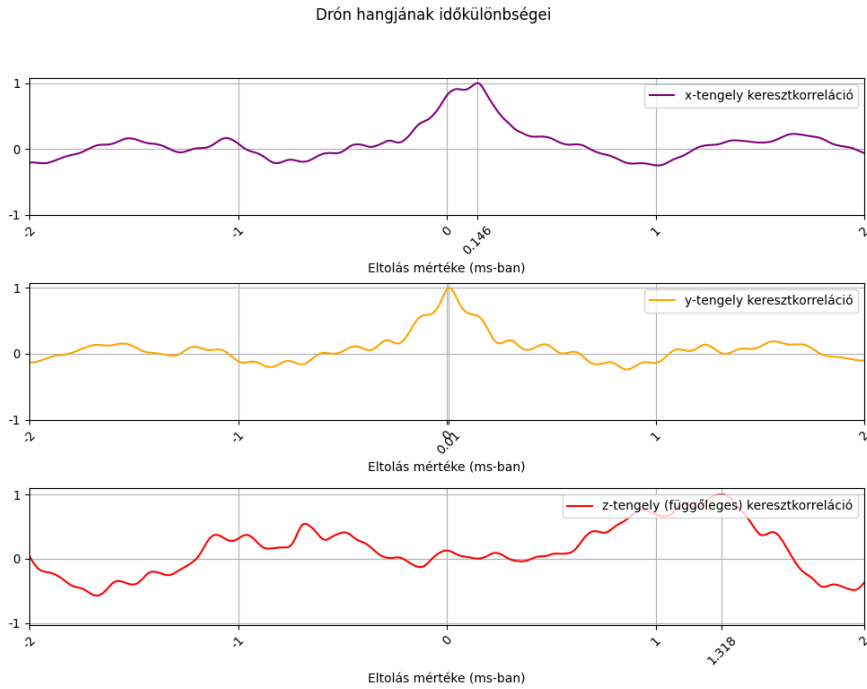
Továbbiakban a hangforrás szerepét egy pilóta nélküli légitáncos töltötte be. Ahhoz, hogy kellő pontossággal tudjuk ezeknek a hangját vizsgálni, szükségünk volt egy olyan kontrollált környezetre, ahol nem fúj a szél és nem volt zaj. Mivel kültéren nem sok ilyen hely van, beltéren kellett elvégezni ezt a mérést, ilyenkor a kellően nagy teremterfogat mellett azonban kulcsfontosságú minimalizálni a falról visszaverődő hangok intenzitását, így a Pannónia Filmstúdió nagy feljátszótermébe szerveztünk ezt.

A csoportmikrofonokon alkalmazott mikrofon típusa DPA 4053 gömbi iránykarakteristikájú, professzionális nyomásérzékeny kondenzátor mikrofon volt. Ezek egy speciális szélzaj ellen védő befogóba kerültek, hogy a propellerek által gerjesztett levegőmozgás ne torzítsa a hasznos hangot, erről a szemléltetés a lejjebb látható A hangfelvételek 192 kHz mintavételi frekvenciával és 24 bites felbontással készültek, miközben a vizsgálathoz különböző típusú pilóta nélküli légitáncosokkal többféle manővert hajtottunk végre.



44. ábra: a mérés során használt mikrofoncsoport

A három tengelyre számolt időkülönbség:



45. ábra: a három tengelyre számított keresztkorrelációs függvény

A függőleges tengelyen a mikrofontávolság 52 cm volt, a többi tengelyen 6 cm, emiatt kaptunk csak nagyságrenddel nagyobb értéket, ezt a különbséget korrigáltuk a számítás során. A theta képletében a nevezőben.

A főnti esetre a számított irányok, az *x-tengelyt* választva főirányul:

$$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{\Delta t_y}{\Delta t_x}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{10,417 \text{ us}}{145,833 \text{ us}}\right) = 4.1^\circ, \quad (11)$$

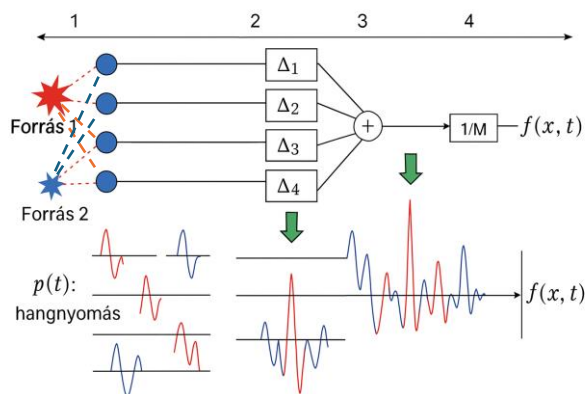
és

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{\Delta t_z \times \frac{d_{x1,x2}}{d_{z1,z2}}}{\sqrt{(\Delta t_y)^2 + (\Delta t_x)^2}}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{1317,708 \text{ us} \times \frac{6 \text{ cm}}{52 \text{ cm}}}{\sqrt{10,417 \text{ us}^2 + 145,833 \text{ us}^2}}\right) = 46.1^\circ. \quad (12)$$

Ezek voltak a pilóta nélküli légi jármű tényleges irányai a térben.

2. Fejlesztési lehetőségek

További fejlesztési lehetőségek között szerepel egy olyan program megvalósítása is, amely valós időben tudja kiszámítani ezeket az irányokat. Érdekes lenne még módosítani a számítási algoritmust, hogy zajos, reflexiókkal telt környezetben is jó közelítést kapjunk az időkülönbségekre. MEMS mikrofonok bevezetésével miniatürizálni lehetne a csoportmikrofonokat, ezáltal például egy mikrokontrollerrel beágyazott rendszerbe tudnánk foglalni az eszközt. A TDOA módszer mellett még a beamforming módszer [3] is bevált a hangforrás lokalizáció területén, ezzel is érdemes lehet dolgozni.



46. ábra: beamforming módszer

3. Összefoglalás

A kezdeti modellalkotás során felvetett módszerek és szempontok a valóságban is megállták a helyüket a rendszer tervezését és üzemeltetését illetően. A mérések kiértékelése során kirajzolt kimutatás kellően pontos eredményt tükröz ahhoz, hogy szemléltetni tudjam, működik a TDOA alapú hangforrás irány- és helymeghatározás módszertana és lehetséges hang alapján lokalizálni egy pilóta nélküli légijármű helyét. A program futása során kiirattam a parancssorba az iránymeghatározó algoritmus futási idejét, ennek nagyságrendje néhány ms volt. A keresztkorrelációs módszer kiválóan implementálható bármilyen mikrokontrolleres vagy más típusú beágyazott rendszerbe.

Hivatkozások

- [1] K. József, Szerző, *Jelfeldolgozás I-II.* [Performance]. Óbudai Egyetem, 2025.
- [2] „Wikipedia,” [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Sound_localization. [Hozzáférés dátuma: 04. 10. 2025.].
- [3] „www.polytec.com,” Polytec GMBH, [Online]. Available: <https://www.polytec.com/us/acoustics/technology/beamforming>. [Hozzáférés dátuma: 10. 2025.].
- [4] D. M. A/S, „DPA 4051/4052/4053 Compact Omnidirectional Microphones”.
- [5] G. S. R. Y. a. Z. Y. B. Xu, „High-Accuracy TDOA-Based Localization without Time Synchronization,” *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, vol. 24, 2013.
- [6] C. K. a. G. Carter, „The generalized correlation method for estimation of time delay,” *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 1976.

Students and Traditions in Mathematics Education

Bálint Nagy

Óbuda University, Kandó Kálmán Faculty of Electrical Engineering, Institute of Electrophysics, Department of Natural Sciences, Budapest, 1034 Bécsi u. 96/a

University of Dunaújváros, Institute of Informatics, Department of Mathematics and Computer Sciences, Dunaújváros, 2400 Táncsics M. u. 1/a

Abstract: In higher education, including mathematics teaching, we face new challenges continuously, which are partly due to the changes in the educational environment and partly due to the changes brought about by technology. During the last few years, the pandemic changed many traits of teaching; some solutions developed for those times have now become part of everyday education. At the same time, disruptive methods have been developed, while the traditional ones are still there. Another challenge we face is the validation of knowledge acquired at other institutions during student transfers, partly due to different curricula, course structures, and credit systems. Recently artificial intelligence has opened new dimensions and raised basic questions related to the future of education. In the present paper, we discuss some actual problems of mathematics teaching, with special interest in the coexistence of new and traditional elements.

Keywords: higher education; mathematics; student success

1 Introduction

The saying ‘the devil is in the details’ draws attention to the fact that any plan, concept, or promise only seems simple until one begins to deal with the specifics. Although everything may appear clear at first glance, when it comes to practical implementation, seemingly minor difficulties often emerge—difficulties that can ultimately halt the entire endeavour [1]. A similar phenomenon can be observed in the widely studied process of teaching and learning, whether approached in general terms or in relation to specific domains. When examining the teaching of mathematics, the question of the importance of details cannot be avoided.

Mathematics is often seen by public opinion as a particularly difficult, abstract field of science that requires considerable effort. As a consequence, there is a commonplace conviction that educators must seize every possible pedagogical

tool to bring closer mathematical thinking and the understanding of related notions to students. However, teaching mathematics at the university level places unique challenges before the instructor: the complexity and level of abstraction of the material increasingly limit the possibility of relying on intuitive and illustrative approaches [2].

In higher-level mathematics education, special attention has to be given to the consistent structuring of course content that spans several semesters. The interdependence of mathematical contents and clarity of terminology and notation are the grounds on which successful construction of knowledge in students takes place. This is so important because in mathematics, terms and notation are not always used uniformly; different conventions have evolved in different parts of the world and within different schools of mathematics [3]. Such disparities occasionally create problems for the integration of course content, especially when studying in an international environment or if the instructor uses elements from several sources [4].

Addressing these challenges requires deliberate pedagogical planning, didactic sensitivity, and a deep understanding of mathematical traditions.

Besides all that, it is necessary to underline that the learning process depends not only on tutors' efforts but also on students themselves [5], who try to use every opportunity for widening their knowledge and making the learning process easier [6, 7]. In the context of contemporary higher education, this already includes, to a large extent, the area of digital technologies, which form part of learning strategies [8, 9]. Nowadays, AI is playing an important role in this respect, helping many students significantly in mastering theoretical material, structuring knowledge, and forming problem-solving skills [10, 11].

Thus, the idea of AI-based tools might be attractive to students for several reasons: they could provide quick, immediate, and personalized feedback; they may offer alternative explanations for information that was difficult to understand; or they may aid in processing and structuring large amounts of information. A more specialized math use can involve demonstrating steps to solve a problem in detail, or showing multiple ways to complete the same task [12].

Meanwhile, it should not be forgotten that the use of AI may also imply the emergence of novel types of learning difficulties. It is possible for students to become overly dependent on this type of tool, at the expense of marginalizing their own way of solving problems. Only then does AI truly become a supporting tool in the learning process-when students use its solution critically, consciously, and reflectively [13].

2 Methodology

The questions that formed the base for our questionnaire research were about university students' experiences of the application of AI in education and what advantages and disadvantages they see in the use of AI in the fall of 2025. The current study investigates university students' attitudes and behaviors regarding the use of artificial intelligence in learning contexts. Two important foci were determined as follows: (1) to what extent do students use AI tools in studying, and (2) how much do students trust answers generated by AI. Based on these themes, the following are relevant research questions and hypotheses.

Research Questions

1. To what extent do university students integrate AI tools into their learning activities?
2. How do the students think about the correctness of AI-generated responses?

Hypotheses

- H1: University students actively use AI tools to support their learning processes.
- H2: Students are displaying low levels of trust in AI-produced answers being correct.

In line with the ethical standards of applied research, participation in the collection of data by questionnaire was voluntary. Before the survey started, clear information on the purpose of the study was communicated to the respondents, together with information on the content of the questionnaire, including the free choice of participation and the possibility at any time to discontinue it, including refusal or withdrawal without negative consequences. It was also pointed out that no personal data were collected within the scope of the research and that responses could not be attributed to the respective respondents in any manner, which meant full anonymity and protection of data. The questionnaire was made available online in the autumn of 2025, enabling wide-ranging, barrier-free access, without collecting any technical data that could identify the participants. The whole process of research was performed in accordance with ethical standards for social science data collection, particularly emphasizing transparency, anonymity, and voluntariness.

3 Results

Grassini AI Attitude Scale (AIAS) is a short questionnaire developed in 2023, which consists of only four items intended to measure individuals' general attitudes toward artificial intelligence [14]. Empirical evidence suggests that the

AIAS exhibits strong internal reliability, providing an effective tool for the swift and reliable assessment of attitudes toward AI across different populations. Respondents grade each statement on a Likert scale, with higher scores reflecting a more positive disposition toward AI. In our present study, we have used this scale to investigate the attitude of our students. The results are shown in Figure 1.

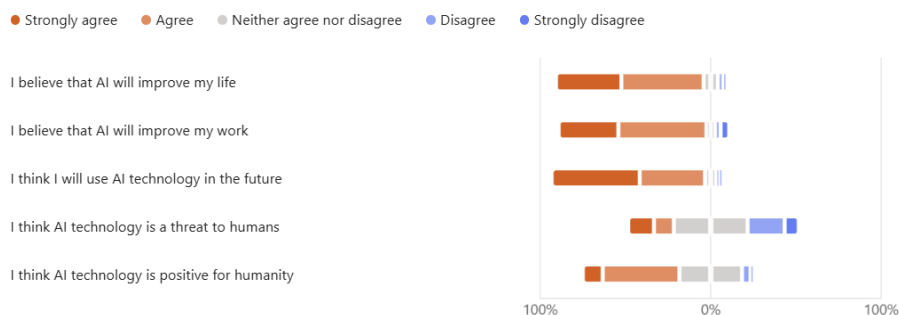


Figure 1

University student's attitude towards AI using Grassini AI attitude scale

Based on the data presented in this chart, the main concerns related to AI use in education become clearly visible. The responses fall into four categories, and their proportions give important insight into which areas need special attention in the future.

The biggest share of concerns deals with data privacy. This shows that among the respondents, of primary concern is the assurance that personal information about students, learning progress, or digital footprints do not fall into unauthorized hands. In most instances, AI systems require the collection and processing of data; hence, participants strongly feel that in the absence of proper safety measures and laws governing data handling, the implementation of AI might be risky.

The second most frequent category deals with the ethical problems of the studied phenomenon. These may vary from possible biases in algorithms through the transparency of the AI decision-making to fair treatment with regard to students. These ethical concerns signal that with the implementation of AI systems, it is not sufficient to consider purely technical and pedagogical aspects, but also ethical guidelines and responsibility frameworks.

Nearly a quarter of the respondents fear that AI may push the role of teachers into the background. This is a concern that seems to suggest many remain uncertain as to how AI can complement teaching without seeking to replace it. Hence, the key challenge will be a clear communication that AI is not here to substitute for teachers but is here to support learning, enable differentiation, and reduce administrative burdens.

Although the “Other” category proportion is relatively small, it has to be underlined that respondents mentioned other, smaller-scale concerns, referring to technical, infrastructural, motivational, or pedagogical problems.



Figure 2

Students' concerns about using artificial intelligence in education

The diagram shows that the majority of the respondents consider the information and assistance provided by AI to be reliable or very reliable. The “Reliable” and “Very reliable” categories together clearly dominate, suggesting that participants generally have positive experiences with using AI-based systems.

The middle of the scale contains a moderate proportion of "Neutral" responses, showing that a smaller group is neither positive nor negative about AI reliability, or perhaps has not yet formed a strong enough opinion.

The categories "Slightly reliable" and especially "Not reliable at all" are low in proportion. This indicates that only a few respondents feel there is something specifically negative or are concerned that AI gives them wrong, misleading, or incorrect information.

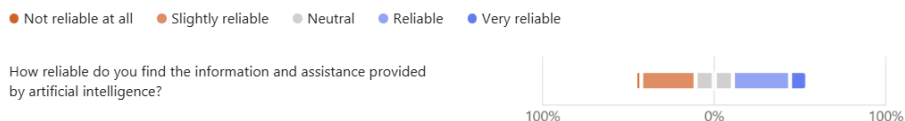


Figure 3

Students' concerns about reliability of artificial intelligence

A qualitative analysis of 50 student responses on appropriate forms of AI in university courses shows a number of emergent themes. The dominant theme was that of personalized learning, represented in 56% of the responses. They stressed that AI could adapt learning content to students' needs, explain complex topics, and serve exam preparation (e.g., mock tests, summaries).

Chatbots and automatic grading were second most frequent, both mentioned by 14% of respondents. The benefit of chatbots was seen as continuous support provided, answering students' inquiries continuously. Automatic grading was viewed as a method to enhance efficiency, freeing faculty from more mundane duties.

Other key themes that came up included learning support functions, such as note-taking, summarizing, and virtual tutor roles, at 12%, and information search at 10%, where AI was described as a superior alternative to traditional search engines for academic research and problem-solving.

A minority (2%) expressed a critical opinion, stating that AI should ideally not replace human educators and warning against cost-driven decisions in education. Another 4% proposed creative applications: adaptive testing and traffic analytics.

Findings show that students see AI as a tool to improve personalized learning experiences and administrative workflows; some few raise concerns about its larger effects on educational quality and equity.

Table 1
Use of Artificial Intelligence in Higher Education according to Students

Theme	Example	Frequency	Percentage
Personalized learning	Personalized learning and making summaries	28	56.00%
Chatbots	chatbots based on teacher's upgraded materials	7	14.00%
Automatic grading	automated grading and correction exams	7	14.00%
Information search	AI acts like a better version of googling	5	10.00%
Learning support	creating notes, virtual tutor	6	12.00%
Critical stance	Ideally, none at all	1	2.00%
Other innovative ideas	Traffic Analytics, Adaptive Testing	2	4.00%

During the semester students were introduced several examples that highlight how important is to critically examine the data and outputs provided by AI.

In the following example, we asked an AI bot to plot the vector field $(-y; x)$. The result, shown in Figure 4 on the left, is clearly unacceptable. Contrary, the correct answer also introduced in Fig. 4 on the right. Similarly, in the context of complex function theory, verifying the Cauchy–Riemann equations also proved problematic, as illustrated in Figure 5.

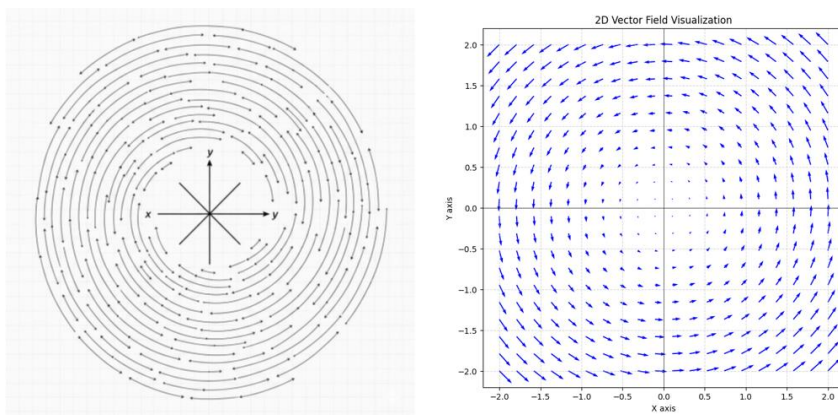


Figure 4
Vector field by AI and a computer algebra system

$$2. \quad f(z) = z^3$$

Let $z = x + iy$. Then:

$$f(z) = (x + iy)^3 = x^3 - 3xy^2 + i(3x^2y - y^3)$$

So:

$$u(x, y) = x^3 - 3xy^2, \quad v(x, y) = 3x^2y - y^3$$

Cauchy-Riemann Equations:

$$\frac{\partial u}{\partial x} = 3x^2 - 3y^2, \quad \frac{\partial v}{\partial y} = 3x^2 - 3y^2$$

$$\frac{\partial u}{\partial y} = -6xy, \quad \frac{\partial v}{\partial x} = -6xy$$

Thus, the equations are satisfied.

Figure 5
Cauchy-Riemann – equations calculated by AI

4 Discussion and conclusions

Our results confirm hypothesis H1, whereas H2 clearly needs to be rejected. It can be clearly concluded from the responses that the student group investigated actively uses artificial intelligence to a great extent, and the majority considers its

use for learning purposes to be adequate. This would suggest that AI tools have already become part of everyday learning processes and that the majority of students consider these technologies as useful resources to support their learning. At the same time, examples presented in the paper also show that solutions given by AI are often doubtful, incorrect, or pedagogically problematic. These findings hint that the use of AI in education opens up new chances but at the same time poses new problems [15, 16]. The reliability of contents generated by AI, the necessity of critical interpretation, and the change of learner autonomy and the teacher's role are only a few questions that demand detailed consideration. Such complex problems need further empirical research, which may contribute to establishing the foundation for the responsible and effective implementation of AI in education.

One of the main areas for development in students is not the instinctive acceptance of ready-made solutions, but rather the ability to weigh those solutions from a critical point of view [17]. That includes, among others, being aware of the fact that not every answer provided by AI is accurate, complete, or interpretable in the correct context. Critical thinking supports them in recognizing possible mistakes, biases, or logical deficiencies and in seeking alternative solutions when necessary. The strengthening of this skill will assure in a long-term perspective that students will apply AI tools consciously, reflectively, and responsibly in their studies and further professional activities.

References

- [1] Dollard, P. A. (1996). Random house dictionary of popular proverbs and sayings-Titelman, GY.
- [2] Chambers, P. (2008). Teaching mathematics. Sage.
- [3] Cajori, F. (1993). A history of mathematical notations (Vol. 1). Courier Corporation.
- [4] Galligan, L. (2004). Preparing international students for university: Mathematics as part of an integrated program. Australian Senior Mathematics Journal, 18(1), 28-41.
- [5] Molnár, G., Szűts, Z., & Biró, K. (2018). Use of augmented reality in learning. Acta Polytechnica Hungarica, 15(5), 209-222.
- [6] A. Kovari, "Digital Transformation of Higher Education in Hungary in Relation to the OECD Report," in DIVAI 2022, 2022, pp. 229–236.
- [7] Bognár, L., Joós, A. (2025) The Impact of Allowing ChatGPT on Responses to Different Question Types in a Mid-Term Math Exam, Dunakavics 13 : 2 pp. 5-14., 10 p.

- [8] Farkas, I., Kővári, A., & Mónika, R.-M. (2024). The emergence of artificial intelligence in education and its impact on individual literacy in higher education. In IEEE, IEEE 7th International Conference and Workshop Óbuda on Electrical and Power Engineering (CANDO-EPE) (old.: 83-88). Budapest, Magyarország.
- [9] Gerlich, M. (2023). Perceptions and acceptance of artificial intelligence: A multi-dimensional study. *Social Sciences*, 12(9), 502.
- [10] Katona, J., & Gyonyoru, K. I. K. (2025). Integrating AI-based adaptive learning into the flipped classroom model to enhance engagement and learning outcomes. *Computers and Education: Artificial Intelligence*, 8, 100392.
- [11] Koenig, P. D. (2024). Attitudes toward artificial intelligence: combining three theoretical perspectives on technology acceptance. *AI & SOCIETY*, 1-13.
- [12] Gyonyoru, K. I. K. (2024). The role of AI-based adaptive learning systems in digital education. *Journal of Applied Technical and Educational Sciences*, 14(2), 380-380.
- [13] Kollar, A. M., & Katona, J. (2024, October). The Reliability of Information Sources: Student Perceptions and Educational Opportunities. In 2024 IEEE 7th International Conference and Workshop Óbuda on Electrical and Power Engineering (CANDO-EPE) (pp. 65-70). IEEE.
- [14] Grassini, S. (2023). Development and validation of the AI attitude scale (AIAS-4): a brief measure of general attitude toward artificial intelligence. *Frontiers in psychology*, 14, 1191628.
- [15] Fošner, A. (2024). University students' attitudes and perceptions towards ai tools: implications for sustainable educational practices. *Sustainability*, 16(19), 8668.
- [16] Acasio, E., Demetillo, J. E., Esclito, A. J., Flor, L., Floresta, C., Javier, E. C., ... & Tadle, F. A. (2024). Attitude Towards AI of University Students.
- [17] Németh, R., Tátrai, A., Szabó, M., & Tamási, Á. (2024). Using a RAG-enhanced large language model in a virtual teaching assistant role: Experiences from a pilot project in statistics education. *Hungarian Statistical Review*, 7(2).

Functional testing of PLC programs using FPGA-based Hardware-in-the-Loop simulation

Levente Andrási, Zita Válint

Levente Andrási, Óbuda University, Kandó Kálmán Faculty of Electrical Engineering, Tavaszmező utca 17, 1084, Budapest, Hungary, andrasilevente5@gmail.com

Zita Válint, Óbuda University, Kandó Kálmán Faculty of Electrical Engineering, Tavaszmező utca 17, 1084, Budapest, Hungary, valintzita@gmail.com

Abstract: Programmable logic controllers are essential tools in industrial automation, but functional testing of control programs is often difficult if the controlled equipment is not available or cannot be shut down. The aim of the research is to create an FPGA-based Hardware-in-the-Loop (HIL) environment that allows real-time testing of PLC programs without the physical manufacturing equipment. The case study is based on a pump performance testing station model, which was developed in a MATLAB/Simulink environment and then emulates the physical behaviour of the equipment by running on an FPGA in the form of HDL code. The control logic runs on a Siemens S7-1200 PLC, while the Digilent Nexys A7 FPGA simulates the signals of the system's sensors and actuators. In the current development phase, the HIL system model and system architecture have been completed, and PLC communication integration and FPGA implementation are in progress. The presentation will introduce the system architecture, the steps of model creation and HDL generation, as well as the experiences gained during implementation. At the current stage of research, the goal of development is to create a flexible HIL platform capable of examining real-time communication between the PLC and the simulated process, thereby enabling early fault detection and functional testing of the control logic. The system's expandability means that it can later be adapted to test various industrial processes, such as pump and valve control systems. The expected result of the project is a HIL test platform capable of safely and reproducibly modelling the behaviour of real industrial environments. Based on the results of the research so far, the FPGA-based HIL approach used in industry can be promisingly adapted for realistic and reproducible testing of PLC control programs.

Keywords: PLC; FPGA; HIL; Testing; Matlab; Simulink; Simulation

1 Introduction

Ensuring the reliability of PLC-based industrial control systems is essential, as faults can lead to downtime, financial loss, or safety hazards. However, functional

testing before commissioning is often limited because the controlled equipment may be unavailable, under assembly, or operating in a production line that cannot be stopped. As a result, developers frequently rely solely on documentation, which may differ from real system behaviour, making early error detection difficult.

To address these challenges, this work applies a Hardware-in-the-Loop (HIL) approach, enabling safe testing without physical equipment and allowing extreme or infrequent operating conditions to be examined. An FPGA is used to execute the plant model in real time, while the PLC runs the original control logic of a pump performance test station. The FPGA emulates the test bench's sensors and actuators through hardware-generated signals. The goal is to create a flexible HIL environment capable of reliably reproducing key process dynamics and supporting early-stage validation of industrial PLC programs.

2 Background & Problem Definition

Before commissioning, PLC programs often cannot be tested on real equipment due to limited availability or ongoing production, even though mistakes at this stage can cause significant losses. Documentation-based testing does not always reflect real operation, and errors—especially human ones—may remain undetected until later phases.

HIL systems offer a practical solution by allowing PLC programs to interact with a simulated plant model under realistic conditions. In this project, the controlled system is a pump performance test station that evaluates pumps based on their Q-H characteristic curve. Variations in flow or differential pressure can reveal manufacturing defects, making reliable testing essential.[3] [11]

Only the functions relevant to the Q-H determination such as flow measurement, differential-pressure calculation, and valve positioning were included in the model. In the proposed HIL setup, the PLC executes the original control logic while the FPGA emulates the hydraulic process and sensor behaviour. This approach provides a safe and reproducible environment for validating the control program and supports the development of more robust test procedures. [5] [6] [9]

3 System Architecture

The system is designed so that the control unit (PLC) and the simulated process (FPGA) communicate with each other in real time via direct electrical signals. In the HIL environment, the PLC plays the role of a controller of a real test bench, while the FPGA emulates the behaviour of the physical equipment. The modular

design of the system allows individual units to be easily expanded or modified during the development and testing process. [7]

The entire layout consists of three main subsystems:

1. **Control subsystem (PLC):** control of the technological process, running control logic, implementation of control algorithms.
2. **Simulation Subsystem (FPGA):** running the plant model in real time, generating sensor signals and actuator feedback.
3. **Communication and level shifting subsystem:** matching voltage level between two devices, galvanic isolation, and conversion of analogue and digital signals.

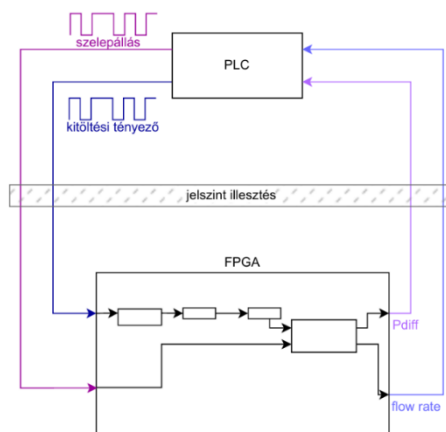


Figure 1 Connection of the subsystems [10]

The connection between the PLC and the FPGA is realized exclusively through physical input and output signals, without the use of a communication protocol. This ensures that the PLC program sees the same signal structures as in a real sensor and actuator network. This allows the results of the HIL test to be applied directly during the commissioning of the real system without any changes to the program.

Proper signal voltage level shifting is key in the system, as the FPGA uses 3.3V logic levels, while the PLC uses 24V industrial-grade input signals. The security of communication is ensured by galvanic isolation, which is realized by a uniquely designed optocoupler and transistor level shifting module.

The entire physical implementation is planned to carry out in a modular DIN rail arrangement, where the PLC, FPGA and level shifter modules are in separate units. This design is also suitable for laboratory demonstrations, educational environments, and industrial testing applications.

The synchronization of the system is due to the timing of the signals and the running speed of the HIL model. Although full cycle level synchronicity cannot be achieved (due to the different architecture of the PLC and FPGA), the system exhibits sufficiently deterministic behaviour to the extent required for functional tests.

4 Modelling and Implementation Approach

The first major milestone in the implementation of the system was the modelling of the pump testing water circuit and the related physical processes in a MATLAB/Simulink environment. The aim is to create a plant model that realistically reflects the dynamics of the hydraulic measuring circuit and is suitable for simulated recording of operating points controlled by the PLC. The structure of the model reflects the functional elements of the real equipment: motor control, hydraulic behaviour of the pump, pipeline elements, throttle valve dynamics, and volume flow and pressure measurement.

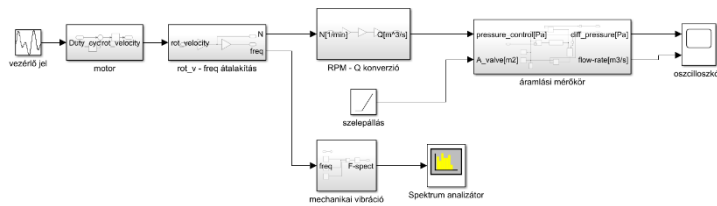


Figure 2 Simulation model assembled from functional sub-systems [10]

4.1 MATLAB/Simulink Model Structure

The model consists of several separate subsystems, which are functionally independent of each other and can be well adapted for future HIL implementation:

- 1. Motor and drive model:** Receives the control signal and generates an equivalent speed. Detailed modelling of the electrical parameters was not necessary, as the RPM is the relevant information from the point of view of the PLC.
- 2. Water transport circuit (pipe section + pump):** Models the characteristics of the pump and the resistance of the pipeline. Differential pressure is the basis for determining the working point.

3. Flow Measurement Block: Determines the volume flowing through the system. The model assumes an ideal measure, since the goal is to investigate regulatory behavior.

4. Valve model (throttling): Adjusts the hydraulic resistance of the circuit and thus the flow rate based on the valve position set by the servo motor.

The "inputs" of the model correspond to the future FPGA inputs: the fill factor of the motor control and the opening angle of the valve. And the "outputs" are the physical quantities required for the PLC: head (calculated from the differential pressure) and flow rate.

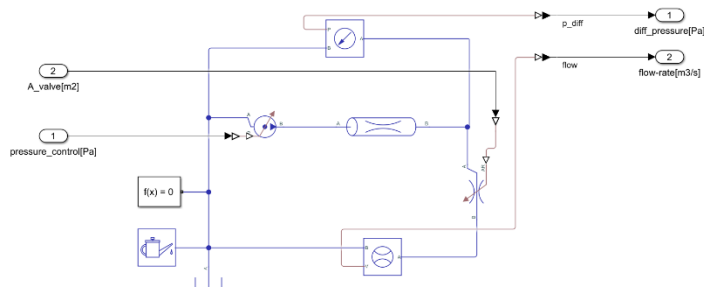


Figure 3 Sub-system of the measuring piping system [10]

During simulation-based validation the correct operation of the Simulink model was validated by recording a Q–H curve. With the gradual reduction of the volume flow (closing the valve), the differential pressure increased as expected, so that the model reproduced the characteristic curve characteristics of real pumps. The curve obtained because of the simulation is well approximated to the shape of typical factory Q–H curves.

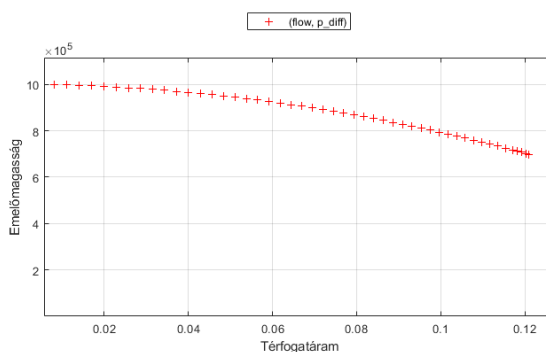


Figure 4 Pump performance curve as result of the simulation [10]

4.2 FPGA Implementation (High-Level Overview)

Based on the completed Simulink model, the functional units that need to be implemented on FPGAs have been determined. In the HIL system, the FPGA is responsible for the real-time reproduction of the simulated physical process and the generation of the sensor signals used by the PLC. About the VHDL implementation in this article we will only give you the overview you need to understand how it works:

1. The main components of the model are implemented as separate VHDL modules (motor, water circuit, valve).
2. Signal processing and data flow between subsystems follow the structure of the Simulink model.
3. The physical quantities (Q and H) are generated as quasi-analog signals for the PLC from PWM and RC filter.
4. The operation is deterministic, thanks to the high clock frequency of the FPGA, it is more accurate in time than a software-based simulation.

The VHDL architecture is not covered in detail in this article, but it is important to note that the modular design of the model allowed for the smooth implementation of the Simulink → HDL transition.

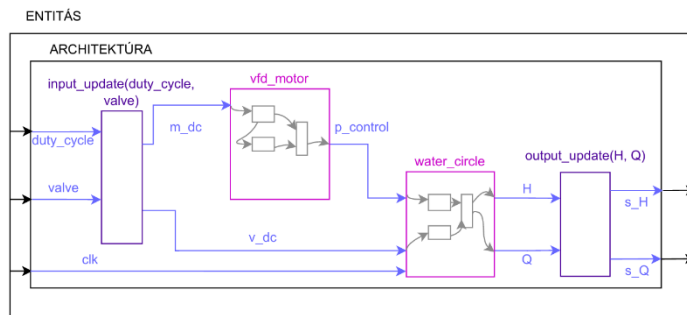


Figure 5 VHDL architecture implementing the internal structure of the HIL system [10]

As a topic of hardware implementation, the physical implementation of the system relies on three main components: the Siemens S7-1200 PLC control unit, the Digilent Nexys A7 FPGA development board, and the custom-designed level control modules. The goal was for the PLC and FPGA to communicate with each other through direct electrical signals under conditions simulating a real industrial environment. During the implementation of this, safety, galvanic isolation and distortion-free transmission of signals were the primary considerations.

4.3 Hardware Components

When choosing the tools used, preference was given to solutions that are widely used in laboratory and industrial environments. The control tasks are performed by the Siemens S7-1200 CPU 1212C PLC, which with its 24 V transistor outputs can produce PWM-based control signals and receive high-speed digital signals. The real-time running of the plant model is performed by the Digilent Nexys A7 FPGA based on the Artix-7 architecture, which provides sufficiently high computing power to run the hydraulic model and generate sensor signals.



Figure 6 SIEMENS Simatic S7 1200 PLC & Digilent Nexys A7 FPGA board [1]
[8]

The interface between the PLC and the FPGA is implemented by a self-designed PCB that contains optocouplers, transistor inverters and RC filters for digital and analog signal transmission. The module has a dual role: on the one hand, to coordinate voltage levels ($24\text{ V} \leftrightarrow 3.3\text{ V}$), and on the other hand, to ensure galvanic isolation, which is of paramount importance for the protection of the development environment and the PLC.

4.4 Signal Transmission and Level Shifting

For the operation of the HIL environment, reliable transmission of signals between the PLC and FPGA is essential. There are three types of signals in the system: PWM-based control signals, quasi-analogue feedback signals, and simple logic status signals.

PWM based control signal (PLC $\rightarrow$ FPGA): The control of the engine speed and valve position is based on a PWM fill factor. The transistor output of the Siemens S7-1200 PLC can generate pulse signals up to 100 kHz, but a PWM frequency of 1 kHz has been used for reliable duty cycle control and level shifting. The signal is transmitted by a PC817 optocoupler, which can properly transmit PWM modulation. The signal at the output of the optocoupler is inverted, so an NPN transistor inverter restores the original logic polarity. [2]

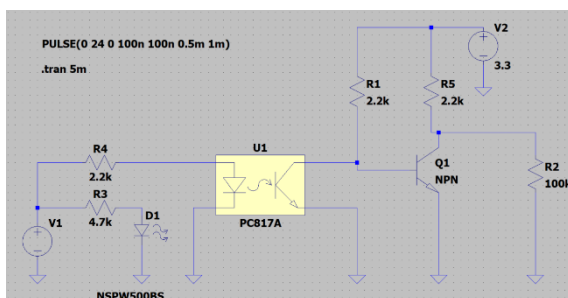


Figure 7 The optocoupler circuit [10]

Production of quasi-analog signals (FPGA → PLC): Since the FPGA cannot generate true analog signals, it generates pressure and flow values in the form of a PWM signal. The average voltage proportional to the fill factor is converted into a quasi-analog signal by a low-pass RC filter, which is amplified by an op-amp amplifier into the analog input range of the PLC from 0 to 10 V. The advantage of the solution is that the PLC treats the signal in the same way as an analogue measurement signal from a real industrial sensor.[4]

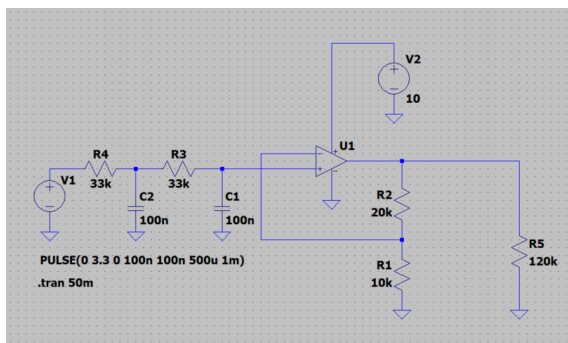


Figure 8 PWM to analog circuit [10]

Digital Status Signals (FPGA ↔ PLC): Error and status signals carry simple logical 1-bit information, so a traditional optocoupler solution can be used for matching. The 3.3V level of the FPGA is isolated by an optocoupler and matched to the 24V input level of the PLC. The inverter stage serves to restore polarity here as well.

4.5 Physical Layout

The physical design of the system is planned to carry out in a modular DIN rail arrangement in which the PLC, FPGA and level shifter modules are in separate units. This solution is easy to clarify, easily expandable and ideal for laboratory

testing. The modular design allows for future developments, such as multi-channel signal matching or the integration of additional sensor models.

5 Results

At the current stage, results are based on simulations and on hardware tests of the signal conditioning circuits. The full PLC-FPGA integration has not yet been completed, so the following findings reflect the behaviour of the verified subsystems.

5.1 Validation of the MATLAB/Simulink Pump Model

The hydraulic model was validated by generating a Q–H curve. As the valve opening decreased, the flow rate dropped and the differential pressure increased, reproducing the characteristic behaviour of centrifugal pumps. These results confirm that the model is suitable for HIL testing, even though the FPGA implementation of the hydraulic subsystem is still under development. [11]

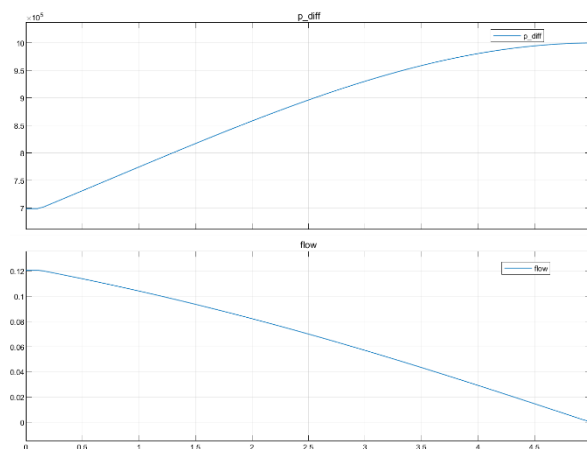


Figure 9 Differential pressure-time & Flowrate-time diagrams [10]

5.2 Testing of Signal Conditioning Modules

The interface circuits were validated in LTSpice and with physical measurements. Tests confirmed that PLC to FPGA PWM signals can be transmitted distortion-free using a PC817 optocoupler. The FPGA to PLC quasi-analog outputs can be reliably generated using PWM + RC filtering + op-amp amplification. The 1-bit

digital status signals also can be isolated and level-shifted using an optocoupler and inverter stage. These results indicate that the signal-conditioning modules form a solid basis for full system integration.

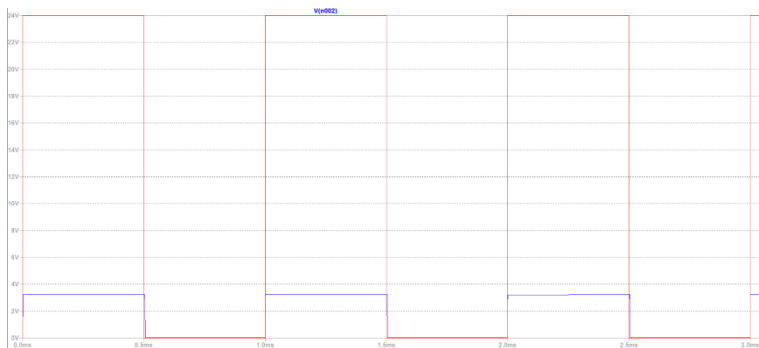


Figure 10 Input(red) & output(blue) signal of the level shifter circuit from PLC to FPGA [10]

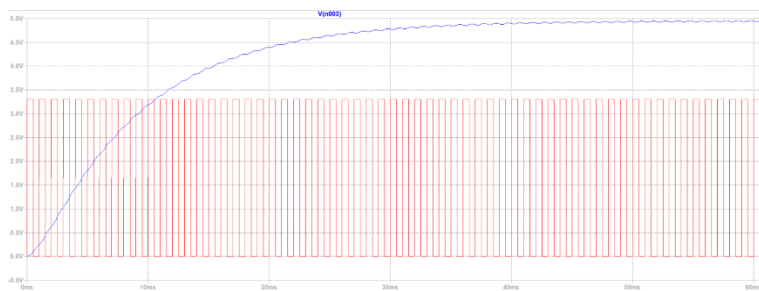


Figure 11 Input(red) & output(blue) signal of the PWM to analog circuit [10]

5.3 Status of the FPGA Implementation

The design of the VHDL-based FPGA architecture is at an advanced stage, and hardware testing has begun. According to the current state, the VHDL components of the motor and water circuit model have been completed. The internal signal management and architecture have been completed. The operation of the modules has been verified at the design level based on Simulink data, but the actual FPGA and PLC connection has not yet taken place.

In the current phase of development, simulated and partially tested results are available, and the integration and real-time verification of the entire HIL configuration will follow as a later step.

5.4 Status of the PLC Program Implementation

The first version of the PLC program to be tested has been completed, which follows a state-based structure. The PLC program is being further developed and is progressing in parallel with the preparation of the validation steps of the HIL system.

Conclusion

This work presented the development of an FPGA-based Hardware-in-the-Loop environment for the functional testing of a PLC-controlled pump performance test station. The hydraulic plant model was successfully created and validated in MATLAB/Simulink, and the required level-shifting and signal-conditioning modules were designed and tested both in simulation and hardware. Although the complete PLC–FPGA integration is still under development, the results obtained so far demonstrate that the proposed architecture can reliably reproduce the key dynamic characteristics of the test bench and can serve as a safe and flexible alternative to physical equipment during early-stage testing.

Future work will focus on completing the FPGA implementation of the hydraulic model, establishing real-time closed-loop operation with the PLC, and performing full HIL validation. The modular structure of the system enables straightforward extensions, such as the integration of multiple sensors or more detailed hydraulic components. Based on the preliminary results, the FPGA-based HIL approach shows strong potential for scalable and reproducible testing of PLC control programs in industrial environments.

Acknowledgment

The authors would like to express their sincere gratitude to **Tamás Sándor** and **Dóníz Borsos** for their continuous professional guidance and support throughout both the original TDK thesis and the ongoing diploma thesis related to this work. Their insights, feedback, and encouragement have greatly contributed to the development and progression of the research.

References

- [1] Siemens, "6ES7212-1AE40-0XB0 Datasheet," [Online]. Available: <https://support.industry.siemens.com/teddatasheet/?format=pdf&mlfbs=6ES7212-1AE40-0XB0&language=en&caller=SIOS>. [Accessed 23 10 2025].
- [2] A. A. Oluwaseyi, "A Low-cost Optocoupler-Based Isolator System for IoT-Based Voltage Measurement in Low and High Voltage DC Applications," *African Scientific Reports*, 2023.
- [3] F. Mihalic, M. Truntic and A. Hren, "Hardware-in-the-Loop Simulations: A Historical Overview of Engineering Challenges," *MDPI*, 2022.

- [4] R. Metivier, "Method for Converting a PWM Output to an Analog Output," 2022.
- [5] D. L. Lukácsi és P. Csizmadija, „Radiális szivattyú jelleggörbéinek kísérleti vizsgálata víz és viszkózus közeg esetén,” 29th International Conference of Mechanical Engineering, 2021.
- [6] P. Lin, Y. Zheng, Y. Long, W. Qiu and R. Zhu, "Study on the Influence of Pump Performance Curve Fitting and Seal Ring Wear on Pump Intelligent Monitoring," *Processes*, vol. 13, 2025.
- [7] M. Ledin, "Hardware-in-the-Loop Simulation," *Embedded Systems Programming*, 1999.
- [8] Digilent, "Nexys A7 FPGA Board Reference Manual," [Online]. Available: https://digilent.com/reference/programmable-logic/nexys-a7/reference-manual?srsId=AfmBOobkBMAYZ9bJvHjCodEsFQXm_WEQ2QgKqplc_dewsxDivUxggIN. [Accessed 12 10 2025].
- [9] J. Delgado, J. Ferreria, D. Covas és F. Avellan, „Variable speed operation of centrifugal pumps running as turbines: Experimental Investigation,” *Renewable Energy*, 2019.
- [10] L. Andrási és Z. Válint, „PLC program funkcionális tesztelése FPGA alapú Hardware-in-the-Loop szimulációval, TDK Thesis, *Óbuda University*, Budapest, 2025.
- [11] Grundfos, The Centrifugal Pump, Grundfos Academy.

Az indítókalicka vezetőanyagának hatása a szinkron motor indítási és elektromágneses jellemzőire

Nagy Sándor

Nagy Sándor, Óbudai Egyetem, Biztonságtudományi Doktori Iskola, 1095 Budapest, Soroksári út 30-34., Magyarország. nagy.sandor@uni-obuda.hu | ORCID: 0009-0004-0790-5758

Kopják József

Dr. Kopják József, Óbudai Egyetem, Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar, 1084 Budapest, Tavaszmező utca 15-17., Magyarország. kopjak.jozsef@kvk.uni-obuda.hu, ORCID: 0000-0002-8225-3244

Nádor Gábor

Dr. Nádor Gábor, Ganz Transzformátor- és Villamos Forgógépgyártó Zrt., 1095 Budapest, Soroksári út 30-34., Magyarország. gabor.nador@ganzelectric.com

Absztrakt: A tanulmány a szinkronmotorok indítási és elektromágneses jellemzőinek vizsgálatát mutatja be különböző indítókalicka-anyagok (réz, alumínium, réz-cink, réz-ón, valamint rézbevonatú alumínium – CCA) alkalmazásával. A cél a legkedvezőbb anyag-geometria kombináció azonosítása, amely kompromisszumot teremt az indítási nyomaték, az áramterhelés és a termikus viselkedés között. A vizsgált motor 6 MW névleges teljesítményű, 6 kV feszültségű és 50 Hz hálózaton üzemel. A szimuláció 2D csatolt elektromágneses-termikus végesselelemes modell alapján készült, 0,5 ms időlépéssel és légrésben finomított hálózattal. A per-unit rendszerben normalizált eredmények alapján a maximális indítónyomaték Cu esetén $\approx 2,87$ p.u., CCA esetén 2,71 p.u., míg Al esetén 2,46 p.u. volt. A gyorsulási idő t_{95} értéke rendre 10,9 p.u., 11,5 p.u. és 13,2 p.u., a Joule-veszteség pedig $E_j = 1,00, 1,04$ és $1,12$ normált egység. A CCA így mérsékelt indítási teljesítményt igényel, miközben hőtechnikai és költségoldalon kedvezőbb a teljes réznél. A vizsgálat igazolja, hogy a csillapítókalicka-anyag megválasztása jelentős hatással van az indítási dinamikára és a hőmérsékleti igénybevételre. A rézbevonatú alumínium (CCA) hibrid vezetőanyag megfelelő kompromisszumot nyújt nagy teljesítményű szinkronmotorok indításához, különösen ipari és energetikai hajtások esetén.

Kulcsszavak: szinkronmotor; csillapító kalicka; rúdanyag; indítónyomaték; végesselem szimuláció; rézbevonatú alumínium (CCA)

1 Bevezetés

A nagy teljesítményű szinkronmotorok kulcsszerepet töltenek be az ipari hajtásokban, ahol a magas hatások, az állandó fordulatszám, a stabil hálózati működés és a hosszú távú üzembiztonság egyaránt alapvető követelmény. Ipari gyakorlatban a 6 kV feletti névleges feszültségű vagy 5 MW feletti névleges teljesítményű gépeket tekintik nagy teljesítményű villamos motoroknak — ezt a kategóriát a Ganz Transzformátor- és Villamos Forgógépgyártó Zrt. tervezési és gyártási gyakorlata is követi. Az ilyen gépeket jellemzően kompresszorok, szivattyúk, ventilátorok, kohászati hengerművek és erőművi segédhajtások területén alkalmazzák, ahol a hálózati indítás (Direct-On-Line, DOL) különösen érzékeny a rotorcsillapítás és az indítókalicka anyagi tulajdonságaira.

A vizsgálat egy 6 MW, 6 kV, 50 Hz névleges paraméterű, kiálló pólusú szinkronmotoros kompresszoron alapul, amely a Ganz Zrt. fejlesztési és szimulációs környezetében lett elemezve az Óbudai Egyetem Kandó Kálmán Villamosmérnöki Karának együttműködésével. A vizsgált géptípus a Ganz-nál gyártott nagy teljesítményű ipari motorok konstrukciós elveit követi, különös tekintettel a csillapítókalicka-rendszer hő- és elektromágneses terhelésére.

A közvetlen hálózati indítás során fellépő nagy áram- és nyomatéktransziens komoly termikus és mechanikai igénybevételt okoz, ezért az indítókalicka-vezető anyagának megválasztása kulcsfontosságú a megbízható indítás és a hosszú távú üzembiztonság szempontjából. A tervezési kompromisszum az indítónyomaték, az áramfelvétel, a hőterhelés és az anyagköltség között keresendő.

A kutatás célja egy olyan összehasonlító elemzés, amely különböző csillapítókalicka-vezetőanyagok — réz (Cu), alumínium (Al), réz-cink (CuZn), réz-ón (CuSn) és rézbevonatú alumínium (CCA) — alkalmazásával vizsgálja a szinkronmotor indítási és elektromágneses jellemzőit. A vizsgálat a végeselemes (FEM) módszerre épül, amely lehetővé teszi a nyomaték, áram és hőmérséklet időbeli és térbeli eloszlásának pontos meghatározását.

A per-unit rendszerben értékelt eredmények segítségével a különböző anyagváltozatok teljesítménye összehasonlíthatóvá vált, így meghatározható az optimális kompromisszum a nagy indítónyomaték, az alacsony veszteség és a gazdaságos anyagfelhasználás között. A tanulmány kiemelten tárgyalja a rézbevonatú alumínium (CCA) hibrid vezetőanyag alkalmazhatóságát, amely a Ganz-féle nagy teljesítményű szinkronmotorok esetében ígéretes alternatívát kínál a hagyományos réz és alumínium megoldásokkal szemben, mind elektromos, mind termikus, mind gyártástechnológiai szempontból.

2 Elméleti háttér

2.1 Az kalickás szinkronmotorok indítási elve

Az indítás során a csillapító- vagy indítókalickával ellátott szinkronmotor az indukciós géphez hasonlóan viselkedik, mivel a forgórész rúdjai rövidrezárt szekunder vezetőként működnek [1]. Háromfázisú feszültség rákapcsolásakor az állórész forgó mágneses mezeje elektromotoros erőt indukál a rudakban, ami áramot és ennek hatására aszinkron nyomatékot hoz létre. Ez a nyomaték gyorsítja a forgórészt mindaddig, amíg annak fordulatszáma meg nem közelíti a szinkronsebességet. Amikor a forgórész fordulatszáma kellően megközelíti az állórész forgó mezejének sebességét, a szinkronizációs szög elérte a kívánt értéket, akkor a gerjesztés bekapcsolható, és a gép — a megfelelő fázisviszonyok teljesülése esetén — szinkron üzemállapotba ugrik.

Az aszinkron gyorsulási szakasz alatt az elektromágneses nyomaték a következő összefüggéssel írható le:

$$M(s) = \frac{3}{\omega_s} \cdot \frac{E_2^2 (R_2/s)}{(R_2/s)^2 + X_2^2} \quad (3)$$

ahol:

$M(s)$ – elektromágneses nyomaték [N·m]

ω_s – szinkron szögsebesség [rad/s]

E_2 – forgórészben indukált elektromotoros erő [V]

R_2 – rotor ellenállás fázisonként [Ω]

X_2 – forgórész szórási reaktanciája fázisonként [Ω]

n – forgórész tényleges mechanikai fordulatszáma [1/min]

n_s – szinkron fordulatszám [1/min]

$S_{\text{billenő}}$ – Billenő nyomatékhoz tartozó szlip érték

s – szlip “csúszás” [], mely következő képlettel adható meg:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (2)$$

Az indítónyomatékot az (1)-es egyenlet $s = 1,0$ (állóhelyzeti) szlip értékére felírva a következő alakban kapjuk:

$$M_{\text{start}} = M_{(s=1)} = \frac{3 E_2^2}{\omega_s} \cdot \frac{R_2}{R_2^2 + X_2^2} \quad (3)$$

A billenő- vagy más néven maximális nyomaték a jelleggörbe csúcspontján jelentkezik. Ennek meghatározásához a nyomaték s szerinti deriváltját egyenlővé tesszük nullával, amelyből a maximum feltétele a következő:

$$\frac{R_2}{s_{\text{billenő}}} = X_2 \Rightarrow s_{\text{billenő}} = \frac{R_2}{X_2} \quad (4)$$

A billenőpontban a nyomaték értéke:

$$M_{\text{max}} = \frac{3E_2^2}{2\omega_s X_2} \quad (5)$$

Az indítónyomaték M_{start} nem egyenlő a maximális nyomatékkal M_{max} . Az indítónyomaték az adott $s = 1$ szlipen értelmezett, míg a maximális nyomaték a motor jelleggörbéjének csúcspontja.

Az indítónyomaték mellett fontos az indítóáram amplitúdójának meghatározása is, mivel az meghatározza az indítókalicka terhelhetőségét és a hálózati feszültségesést. Az indítási szakaszban ($s = 1$, álló helyzetben) az indítóáram csúcserőértéke a következőképpen írható fel:

$$I_{\text{start}} = \frac{\sqrt{3} \cdot U_1}{\sqrt{\left(R_{\text{állórész}} + \frac{R_2}{s}\right)^2 + (X_1 + X_2)^2}} \quad (6)$$

ahol:

- I_{start} – az indítóáram csúcserőértéke [A]
- U_1 – az állórész feszültsége (hálózati feszültség) [V]
- $R_{\text{állórész}}$ – az állórész ohmos ellenállása [Ω]
- X_1 – az állórész szórási reaktanciája [Ω]
- R_2 – a forgórész (indító-kalicka rúd) ellenállása [Ω]
- X_2 – a forgórész szórási reaktanciája [Ω]
- s – szlip az indítás kezdetén (álló helyzetben)

ahol az egyenletet az $s = 1$ értéken kell értékelni. Az rúdanyag elektromos vezetőképessége (R_2 értékén keresztül) közvetlenül befolyásolja az indítóáram nagyságát: alacsony ellenállású anyagok (pl. Cu, CCA) nagyobb indítási áramot eredményeznek, míg a magasabb ellenállású ötvözetek (pl. CuZn, CuSn) csökkentett indítóáramot hoznak létre.

A (4) egyenletben szereplő feltétel teljesülésekor a nyomaték maximuma a (5) képlettel adható meg, amely a kihúzható nyomaték elméleti értékét határozza meg. A rúdanyag elektromos tulajdonságai és a horony geometriája alapvetően befolyásolja az indítóáram és az indítónyomaték alakulását. A nagyobb ellenállású anyagok – mint a sárgaréz (CuZn) vagy a bronz (CuSn) – kisebb indítóáramot, ugyanakkor nagyobb indítónyomatékokat eredményeznek a nagy csúszású tartományban. Az alacsony ellenállású anyagok, például a réz (Cu), ezzel szemben nagy indítási áramot vesznek fel, de a kis rotoellenállás miatt kisebb

indítónyomatékot hoznak létre, ami mérsékeltőbb gyorsulást és nagyobb termikus terhelést okoz [2], [4].

A relatív egységenkénti (per-unit) elemzéshez minden mennyiség a referencia szinkronmotor névleges értékeire lett normalizálva

$$M_{\text{bázis}} = M_{\text{névleges}}$$

$$I_{\text{bázis}} = I_{\text{névleges}}$$

$$R_{\text{bázis}} = R_{2,\text{Cu}} (20^\circ\text{-on mérve})$$

A relatív egységenkénti időértékek szintén normalizálva lettek a réz referenciaesetre, vagyis

$$t_{\text{bázis}} = t_{95,\text{Cu}}$$

Ez a megközelítés biztosítja, hogy az öt vizsgált anyag összehasonlítása független legyen az adott gép méretétől és névleges teljesítményétől.

2.2 Termikus és dinamikus viselkedés

A közvetlen hálózati (DOL) indítás során a szinkronmotor forgórészében lejátszódó elektromágneses és hőmérsékleti transziens folyamatok együttesen határozzák meg a gép dinamikus válaszát és indítási viselkedését [2], [3]. Az indítási szakaszban a indítókalicka rudjain keresztül nagy áramok folynak, amelyek Joule-veszteséget, ezáltal hőfejlődést okoznak. A hőmérséklet növekedése a rúd anyagának ellenállását is módosítja, így az elektromágneses és termikus jelenségek egymással kölcsönhatásban zajlanak. Az alábbi analitikus összefüggések a forgórész pillanatnyi Joule-veszteségét, hőmérséklet-változását és mechanikai gyorsulását írják le, ezáltal meghatározva a különböző rúdanyagok összehasonlításához használt csatolt elektrotermikus-mechanikai modellt.

A forgórész rudjainak pillanatnyi Joule-vesztesége az alábbi módon adható meg:

$$P_J(t) = I_{\text{bar}}^2(t) R_2(T) \quad (7)$$

ahol a hőmérsékletfüggő ellenállás a (4) összefüggéssel írható le:

$$R_2(T) = R_{20} [1 + \alpha(T - 20^\circ\text{C})] \quad (8)$$

A rúd hőmérsékletének időbeli alakulását egy elsőrendű termikus modell írja le, amely figyelembe veszi a hőkapacitást és a környezettel való hőcserét:

$$C_{th} \frac{dT}{dt} = P_J(t) - \frac{(T - T_{amb})}{R_{th}} \quad (9)$$

A forgórész mechanikai gyorsulását az alábbi egyenlet határozza meg:

$$J_{tot} \frac{d\omega}{dt} = M(s) - M_L(\omega) - M_{fw} \quad (10)$$

ahol:

$P_J(t)$ - pillanatnyi Joule-veszteség [W]

$I_{bar}(t)$ - rúdáram [A]

R_{20} - ellenállás 20 °C-on [Ω]

α - hőmérsékleti ellenállási együttható [1/K]

C_{th} - rúdanyag fajlagos hőkapacitása [J/K]

R_{th} - hőellenállás a környezettel szemben [K/W]

T - rúd hőmérséklete [°C]

T_{amb} - környezeti hőmérséklet [°C]

J_{tot} - összes tehetetlenségi nyomaték (rotor + terhelés) [kg·m²]

ω - pillanatnyi szögsebesség [rad/s]

$M_L(\omega)$ - terhelési nyomaték [N·m]

M_{fw} - súrlódási és örvényáram-veszteségből származó nyomaték [N·m]

Az (1)–(10) összefüggések adják az analitikai keretet a különböző rúdanyagok összehasonlításához, azonos geometriai és terhelési feltételek mellett, lehetővé téve az elektromágneses, hőtechnikai és mechanikai folyamatok együttes értékelését [3].

Az analitikus modell így biztosítja a tranziens viselkedés összehasonlíthatóságát különböző rúdanyagok esetén, és közvetlen inputként szolgál a végeselemes szimulációkhoz, amelyek a későbbi fejezetekben kerülnek bemutatásra.

3 Módszertan

A vizsgálat célja a különböző rúdanyagok hatásának elemzése a indítókalickás szinkronmotorok elektromágneses és termikus viselkedésére a közvetlen hálózati (DOL) indítás során. A módszertan egy analitikus és numerikus, kétdimenziós végeselemes (FEM) alapú megközelítésre épül, amely lehetővé teszi a nyomaték-, áram- és hőmérséklet-idő függvények pontos meghatározását. Az eljárás a korszerű tranziens FEM-modellezési technikákra támaszkodik, amelyek korábban is sikeresen alkalmazásra kerültek nagy teljesítményű szinkrongépek analízisében [11]. Jelen tanulmányban a módszert kiterjesztettük az anyagtól függő veszteségek és a hőmérsékleti folyamatok részletes értékelésére.

Az alkalmazott elemzési folyamat fő lépései a következők voltak:

- Alapmotor definiálása: azonos geometriai és üzemi paraméterekkel rendelkező referencia szinkronmotor kijelölése, amely minden vizsgált anyag esetében az összehasonlítás alapját képezte.

- Rúdanyagok kiválasztása: reprezentatív vezetőanyagok (Cu, Al, CuZn, CuSn, CCA) meghatározása, amelyek jellemzően alkalmazásra kerülnek nagy teljesítményű forgógépek csillapítókalickáiban.
- Analitikai és numerikus értékelés: az elektromágneses és termikus jelenségek leírására analitikai számítások, valamint tranziens, kétdimenziós FEM-szimulációk elvégzése a nyomaték, az áram és a hőmérséklet alakulásának meghatározására.

Minden esetben azonos elektromos és mechanikai peremfeltételeket alkalmaztuk, hogy az egyes anyagok viselkedésének összehasonlítása objektív, méretfüggetlen és következetes alapokon történjen.

3.1 Alapmotor és modellparaméterek

A különböző rúdanyagok objektív összehasonlítása érdekében egy egységes referencia-szinkronmotort vettünk alapul, amelynek geometriája és üzemi feltételei minden vizsgálatban változatlanok maradtak. A referencia gép egy 6 kV-os, 6 MW-os, kiálló pólusú szinkronmotor, amely a Ganz Transzformátor- és Villamos Forgógépgyártó Zrt. ipari hajtásokban alkalmazott tipikus konstrukciós elveit követi, például kompresszorok, szivattyúk és ventilátorok meghajtására. A gép legfontosabb geometriai és elektromos paramétereit az I. táblázat tartalmazza [5], [6].

Az állórész és a forgórész szerkezete minden szimuláció során rögzített maradt; kizárólag a kalickarudak anyagi tulajdonságait változtattuk, hogy az eredmények az anyaghatásokat különítsük el a geometriai tényezőktől.

Az elektromágneses modellt analitikai számítások és kétdimenziós végeselemes (FEM) szimulációk kombinációjával változtattuk meg, amelyek célja az elektromágneses nyomaték, az állórészáram és a fluxussűrűség eloszlásának meghatározása volt a közvetlen hálózati (DOL) indítás teljes időtartama alatt.

A rotorrúd elektromos ellenállását az alábbi egyenletek alapján határoztuk meg:

$$R_{2,20} = \rho_{20} \frac{l_{\text{bar}}}{A_{\text{bar}}} \quad (11)$$

$$R_2(T) = R_{2,20}[1 + \alpha(T - 20^\circ\text{C})] \quad (12)$$

ahol:

$R_{2,20}$ - a rúd ellenállása 20 °C-on [Ω]

$R_2(T)$ - a rúd ellenállása adott hőmérsékleten

ρ_{20} - az anyag fajlagos ellenállása 20 °C-on [$\Omega \cdot \text{m}$]

l_{bar} - a rúd hossza [m]

A_{bar} - a rúd keresztmetszeti területe [m^2]

- α - hőmérsékleti ellenállási együttható [1/K]
 T - a rúd pillanatnyi hőmérséklete [°C]

A (11) egyenlet segítségével a rudak névleges (20 °C-os) ellenállása számítható, míg a (12) összefüggés a hőmérsékletváltozás hatását veszi figyelembe. Ezeket a paramétereket használtuk a tranziens Joule-veszteségek és a hőmérséklet-emelkedés kiszámításához a (9)–(12) egyenletek alapján.

A termikus és mágneses csatolás a végeselemes modellben úgy lett figyelembe véve, hogy a hőmodul a szimuláció során a kalickákban elhelyezkedő rudakban keletkező Joule-veszteséget ($P_J = I_{2bar} \cdot R_2$) automatikusan továbbította a termikus hálózatba, biztosítva ezzel az elektromágneses és hőfolyamatok közvetlen kölcsönhatását.

3.2 Vizsgált rúdanyagok

A vizsgálat során öt különböző kalickarúd-anyag elektromos, termikus és sűrűségi tulajdonságait vettük figyelembe: réz (Cu), alumínium (Al), sárgaréz (CuZn), bronz (CuSn) és rézbevonatú alumínium (CCA). Ezen anyagok kiválasztása ipari szempontból releváns, mivel mindegyik típus gyakorlati alkalmazásban is előfordul szinkronmotorok, illetve más nagy teljesítményű forgógépek csillapító- vagy indítókalickáiban.

Az öt vizsgált anyag legfontosabb fizikai és hőtechnikai jellemzőit az I. táblázat tartalmazza.

1. táblázat

A vizsgált rúdanyagok fizikai és termikus tulajdonságai.

Anyag	Fajlagos ellenállás ($\mu\Omega \cdot \text{cm}$)	Hővezető képesség ($\text{W/m} \cdot \text{K}$)	Sűrűség (g/cm^3)	Hőmérsékleti együttható (1/K)
Cu	1,72	385	8,9	0,0039
Al	2,82	237	2,7	0,0040
CuZn	6,00	120	8,5	0,0015
CuSn	5,50	70	8,8	0,0012
CCA	2,10	200	3,5	0,0035

Az összehasonlítás pontossága érdekében minden rúdanyag esetében azonos geometriai alkalmaztunk mind az analitikai számítások, mind a végeselemes szimulációk során. A rudak hossza és keresztmetszete a 6 MW-os, 6 kV-os kiemelkedő pólusú szinkronmotorokban szokásos méreteket tükrözi, az alábbi értékekkel:

$$l_{bar} = 0,45\text{m}$$

$$A_{bar} = 2,8 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

A szimulációk kezdőfeltételeként a rudak kezdeti hőmérsékletét a környezeti értékkel azonosan $T = 25\text{ °C}$ hőmérsékletre állítottuk be.

Ezeket a paramétereket alkalmaztuk a hőmérsékletfüggő rotoellenállás kiszámításához és a tranziens Joule-veszteségek, illetve hőmérséklet-emelkedések meghatározásához a (9)–(12) egyenletek alapján. Az azonos geometriai és termikus feltételek biztosították, hogy a szimulációk kizárólag az anyagtulajdonságokból eredő különbségeket tükrözzék.

3.3 A relatív egységenkénti normalizálás és alapmennyiségek

Annak érdekében, hogy az eredmények függetlenek legyenek a motor névleges teljesítményétől és méretétől, minden elektromos és mechanikai mennyiség relatív egységekben (per unit, p.u.) formában került kifejezésre. A relatív egységek alkalmazása lehetővé teszi a különböző rúdanyagok viselkedésének közvetlen, méretfüggetlen összehasonlítását azonos referenciafeltételek mellett.

A normalizálás alapjául a referencia szinkronmotor névleges paraméterei szolgáltak, az alábbi összefüggések szerint:

$$M_{\text{bázis}} = M_{\text{rated}}$$

$$I_{\text{bázis}} = I_{\text{rated}}$$

$$R_{\text{bázis}} = R_{2,\text{Cu}}$$

$$t_{\text{bázis}} = t_{95,\text{Cu}}$$

A szinkron sebesség 95%-ának eléréséhez szükséges idő azért releváns összehasonlítási metrika, mert ezen a ponton a rotor szinkronba ugratható, vagyis képes a véglegesen szinkron sebességre való átlépésre. Ez a kritikus küszöb az aszinkronos és szinkron működési tartomány között, ahol az elektromágneses, mechanikai és dinamikai feltételek kombinációja lehetővé teszi az aszinkronos gyorsulási fázisból a szinkron működésbe való átmenetet. Ezért választottuk ezt a paramétert a különböző rúdanyagok indítási dinamikájának összehasonlítása során – ez az érték közvetlenül tükrözi, hogy mely motorok képesek gyorsabban elérni a szinkronizációs feltételeket

A megfelelő mennyiségek relatív egységenkénti alakra történő átváltása az alábbi módon történt:

$$M_{\text{p.u.}} = \frac{M}{M_{\text{bázis}}} \quad (14)$$

$$I_{\text{p.u.}} = \frac{I}{I_{\text{bázis}}} \quad (15)$$

$$R_{2,\text{p.u.}} = \frac{R_2}{R_{\text{bázis}}} \quad (16)$$

$$t_{p.u.} = \frac{t}{t_{bázis}} \quad (17)$$

A 6 MW-os, 6 kV-os, négyfázisú (50 Hz, ≈ 1500 1/min) referencia szinkronmotor esetében az alapyomatók meghatározása a következőképpen történt:

$$M_{bázis} = M_{rated} = \frac{9,55 \times P_{kW}}{n_{rpm}} = \frac{9,55 \times 6000}{1500} \approx 38,2 \text{ kNm} \quad (18)$$

Ennek alapján 1,0 p.u. nyomaték $\approx 38,2$ kN·m fizikai értéknek felel meg. Ez a normalizálási eljárás biztosítja, hogy a vizsgálati eredmények – függetlenül a gép tényleges teljesítményétől – közvetlenül összehasonlíthatók legyenek az egyes rúdanyagok esetében.

3.4 Szimuláció értékelése

A különböző rúdanyagok viselkedésének vizsgálata minden esetben azonos közvetlen hálózati (DOL) indítási feltételek mellett történt, biztosítva ezzel az összehasonlíthatóságot. A referenciatételek a következők voltak:

$$U_N = 6 \text{ kV},$$

$$f = 50 \text{ Hz}$$

$$T_{amb} = 25^\circ\text{C}$$

A terhelési nyomatéket konstans ellentétes nyomatékként modelleztük, amely az indítás során a névleges nyomaték 50%-ának felelt meg:

$$M_L(\omega) = 0,5 M_{névleges}$$

A tranziens végeselemes szimulációk 0,5 ms időlépéssel, a pólusosztásonként 25 000–30 000 elemű hálón kerültek lefuttatásra, amely elegendő időbeli és térbeli felbontást biztosított az elektromágneses és hőtechnikai folyamatok pontos követéséhez. A háló konvergencia-vizsgálata alapján a numerikus hiba 2 %-on belül maradt, ami megfelelő pontosságot biztosít a tranziens eredmények értékeléséhez.

Az értékelés során az alábbi jellemzőket határoztuk meg:

- Nyomaték–szlip görbék $M(s)$: az indítás közbeni elektromágneses nyomaték alakulása.
- Állórészáram és fordulatszám az idő függvényében $I(t)$, $\omega(t)$: a forgórész gyorsulási és elektromos tranziens jellemzőinek meghatározására.
- Rúd hőmérsékletének időfüggése $T(t)$: a kalickarudak felmelegedésének és hőstabilitásának vizsgálatára.

- Indítás közben elnyelt energia $\int P_j(t)dt$: a rotorrudakban disszipált Joule-veszteségi energia meghatározására.

Az összes eredményt relatív egységenkénti (p.u.) formában ábrázoltuk hogy a különböző anyagok elektromágneses és termikus viselkedése közvetlenül összehasonlítható legyen. A 2–4. ábrák a réz (Cu) alapeset tipikus szimulációs kimeneteit mutatják be, amelyek referenciaként szolgáltak a további anyagvizsgálatok értékeléséhez.

4 Eredmények

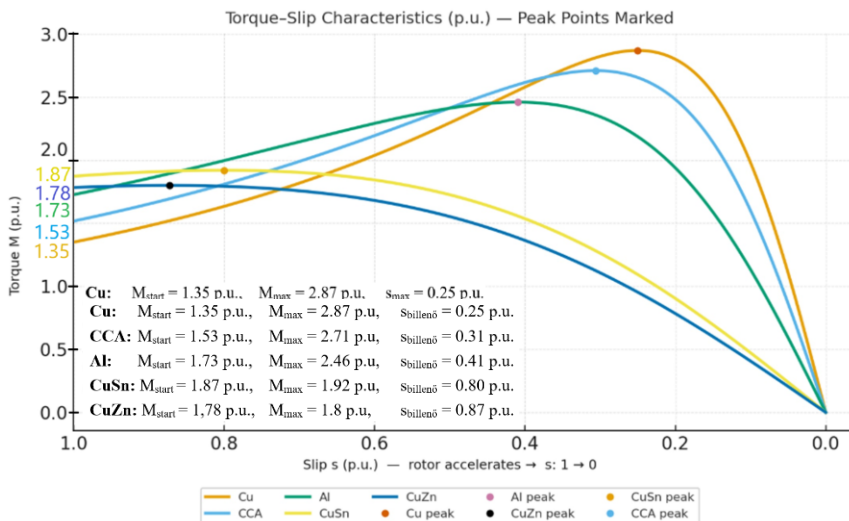
Ebben a fejezetben a különböző rúdanyagokra – réz (Cu), alumínium (Al), sárgaréz (CuZn), bronz (CuSn) és rézbevonatú alumínium (CCA) – végzett analitikai számítások és dinamikus, kétdimenziós végelelemes (FEM) szimulációk eredményei kerülnek bemutatásra. A vizsgálatok célja annak feltárása volt, hogy az anyagok elektromos és termikus tulajdonságai miként befolyásolják a szinkronmotor indítási nyomatékát, áramfelvételét, hőmérséklet-emelkedését és gyorsulási viselkedését.

Az eredményeket relatív egységekben fejeztük ki, így azok közvetlenül összevethetők egymással, függetlenül a gép tényleges méretétől vagy teljesítményétől. A normalizálás alapjául a 6 MW-os, 6 kV-os referencia szinkronmotor szolgált, amelynek névleges nyomatéka, árama és szinkronfordulatszáma képezte a mérési bázist.

A továbbiakban részletesen bemutatásra kerülnek a rúdanyagok elektromágneses és hőtechnikai jellemzői, a nyomaték– szlip görbék, az indítási áram és sebesség időfüggése, valamint a Joule-veszteségek és a hőmérséklet-emelkedés alakulása, kiegészítve a tapasztalt trendek értelmezésével.

4.1 Nyomaték-szlip jellemzők

A különböző rúdanyagok elektromágneses nyomatékának alakulását a szlip (s) függvényében az 1. ábra szemlélteti. A függőleges tengely a nyomatékot (M) relatív egységekben [p.u.], a vízszintes tengely pedig a szlipet (s) mutatja, amely 1-től (álló rotor, indítás pillanata) 0-ig (szinkron fordulatszám) terjed. Az 1. ábra X tengelyén a forgórész jobbra haladva gyorsul, míg az Y tengelyen az indítónyomatékokat (s = 1, az Y tengely bal oldalán) és a maximális billenő nyomatékokat (a görbék csúcsai, színes pontokkal jelölve) szemlélteti.



1. ábra

A vizsgált rúdanyagok nyomaték-szlip jelleggörbéi, amelyeket 2-D végelelemes szimulációkból (ANSYS Maxwell) nyertek azonos DOL kiindulási feltételek mellett.

Fig. 1. (Megjegyzés: Az s szlip1-ről 0-ra csökken - azaz s = 0 a szinkron sebességnek felel meg, s = 1 pedig álló helyzetnek. A forgórész a vízszintes tengelyen balról jobbra haladva gyorsul. Y tengely: Nyomaték M (p.u.), 1,0 p.u. = 38 kN·m → 1 osztás = 19 kN·m; X tengely: Szlip s (–), 1 osztás = 0,2 = 20 % csúszás.)

Indítónyomaték értelmezése (s = 1, álló helyzetben)

Az indítási pillanatban az indítónyomaték a motor indítóképességének legfontosabb paramétere, mivel csak akkor tud a motor terhelést felvenni, ha az indítónyomaték meghaladja a terhelő nyomatékot. Az 1. ábra Y tengelyén jól látható, hogy az indítónyomaték értékei fordított összefüggésben állnak a rúdanyag elektromos vezetőképességével. A II. táblázatban összefoglalt eredmények szerint a bronz (CuSn) és a sárgaréz (CuZn) rudakkal szerelt motorok a legnagyobb indítónyomatékot (1,87 p.u. és 1,78 p.u.) biztosítják, míg a réz (Cu) rudak a legkisebb indítónyomatékot (1,35 p.u.) eredményezik. Ez az összefüggés az elektromágneses alapelvekből érthető meg: az indítónyomaték az indítókalicka ellenállásával arányos az s = 1 pontban. Következésképpen a magasabb ellenállású anyagok nagyobb indítónyomatékot, míg az alacsony ellenállású anyagok kisebb indítónyomatékot biztosítanak.

Gyakorlati szempontból ez azt jelenti, hogy amennyiben a motor nehéz indítási feltételek között (nagy tehetetlenségi nyomaték, nehéz külső terhelés indítás pillanatában) üzemel, a magasabb ellenállású ötvözetek (CuZn,

CuSn) előnyösebbek, mivel garantálják a motor beindíthatóságát a nagyobb gyorsító nyomatékkal.

Maximális (billenő) nyomaték értelmezése

A görbék csúcspontjai jelzik a maximális vagy billenő nyomatékot. Az 1. ábra és a II. táblázat adatai szerint az alacsony ellenállású anyagok (réz: 2,87 p.u., CCA: 2,71 p.u.) nagyobb maximális nyomatékot biztosítanak, mint a magasabb ellenállású ötvözetek (bronz: 1,92 p.u., sárgaréz: 1,80 p.u.). Ez ellentétes tendencia az indítónyomatékhoz képest. A maximális nyomaték a szlip növekedésével csökken az alacsony ellenállású anyagok esetében, míg a magasabb ellenállású anyagok esetében a nyomatékgörbe laposabb lefutása, de csökkent csúcsértéke figyelhető meg.

Az indítási dinamika jellegzetességei

Az 1. ábra görbéi jól szemléltetik az indítási folyamat elektromágneses viszonyait. Az indítás kezdetén az indítónyomaték értéke az anyagtól függően 1,35–1,87 p.u. között változik. Ez az érték kritikus, mivel az indítási fázis során csak akkor kezd el forogni a motor, ha az indítónyomaték elegendő a terhelési nyomaték legyőzésére. A motor ezt követően a kezdeti indítónyomatékról felgyorsul a billenő nyomatékig terjedő szlip-tartományban. Ebben a szakaszban az alacsony ellenállású anyagok (réz, CCA) gyorsabban szállítanak energiát a forgórészbe, mivel bennük nagyobb áram indukálódik. Végül, ahogy a motor megközelíti a szinkron sebességet, az alacsony ellenállású anyagok (réz, CCA) nagyobb gyorsulást biztosítanak a nagyobb billenő nyomaték miatt, és a szinkron fordulathoz közelebbi felfutást eredményeznek.

Gyakorlati következtetés és anyagválasztás

Az eredmények alapján a rúdanyag választása komplex mérlegelést és összetett megfontolást igényel az indítási feltételekben, melyek közül kiemelt szerepet érdemel az indítónyomaték és a hőképzés közötti egyensúly megtalálása. Nehéz indítási feltételek esetén a magasabb ellenállású anyagok (CuZn, CuSn, Al) előnyösebbek, mivel nagyobb indítónyomatékot biztosítanak. Azonban az indítás során jelentősen nagyobb Joule-hőképzésre vezetnek, amely a rotor termikus terhelésének növekedéséhez vezet.

Ezzel szemben az alacsony ellenállású anyagok (réz, CCA) indítás során kisebb hőterhelést okoznak, de az indítónyomaték is alacsonyabb. A CCA anyag jó kompromisszumot képez, mivel az optimalizált összetétele révén csökkentett Joule-veszteséget és megfelelő indítónyomatékot biztosít.

A 1-4 ábrákon bemutatott szimulációs vizsgálatok melyek értékei megtekinthetők a II. táblázatban, demonstrálják az anyagválasztás hatását a szinkronmotor indítási szakaszára.

4.2 Indítás áram és sebesség függvényében

A közvetlen hálózati (DOL) indítás tranziens viselkedését a 2. és 3. ábra szemlélteti. A 2. ábra az indítás alatti forgórészáram (I_2) relatív értékét mutatja az idő (t) függvényében, míg a 3. ábra a motor szögsebességének (ω) alakulását ábrázolja ugyancsak relatív egységekben.

A 2. ábra az indítóáram időbeli alakulását mutatja: az áram az indítás pillanatában ($t \approx 0$) azonnal megjelenik a maximális értéknél, majd idővel csökken. Ez az aszinkron indítási fázis jellegzetessége: az indukált áram azonnal felépül az állórész és forgórész közötti elektromágneses csatolás miatt, majd a rotor szinkron sebesség felé közeledésével (szlip csökkenésével) az indukált áram szisztematikusan lecseng.

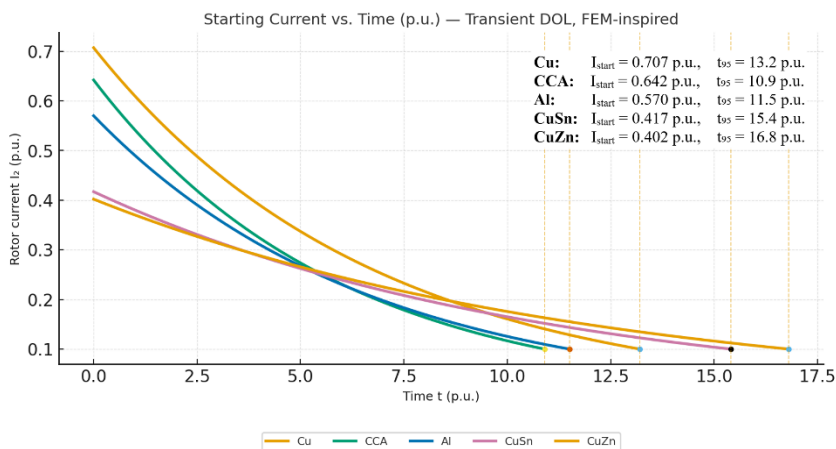
Az indítóáram csúcserő és annak lecsengésének üteme erősen függ a rúdanyag elektromos vezetőképességétől, amit az 2. ábra jól szemléltet.

- A réz (Cu) rudakkal ellátott motor veszi fel a legnagyobb indítási áramerősséget (0,707 p.u.), ami az alacsony ohmos ellenállásból és az erős elektromágneses csatolásból következik. Ez az alacsony rotoellenállás és az erős mágneses csatolás az indítás kezdetében ($s=1$) viszonylag alacsonyabb indítónyomatékot eredményez (1,35 p.u., lásd 4.1 fejezet), azonban az alacsony ellenállás és a magas áram szinkronizálásra való hajlamot jelent. Fontos megjegyezni, hogy a réz nagy maximális (billenő) nyomatékot biztosít (2,87 p.u.). Az indítás során azonban a kis rotoellenállás miatt az indítási energiaátadás intenzív, ami nagyobb hőterhelést okoz az alumínium (Al) és a rézbevonatú alumínium (CCA) rúdanyagokhoz viszonyítva
- Az „Al” és „CCA” rúdanyagok kisebb indítási áramerősséget eredményeznek (0,570 és 0,642 p.u.), és az áram lecsengése simább, közel exponenciális jellegű. Ezekben az anyagokban a közepes rotoellenállás kiegyensúlyozottabb indítónyomatékot biztosít (Al: 1,73 p.u., CCA: 1,53 p.u.), miközben a veszteségek és a termikus igénybevétel mérsékeltebbek, mint a tiszta réz esetében.]
- A sárgarézt (CuZn) és a bronz (CuSn) nagy fajlagos ellenállása miatt az indítóáram alacsonyabb és laposabb görbét mutat (0,402 és 0,417 p.u.). A nagy rotoellenállás viszont jelentős indítónyomatékot eredményez az $s=1$ pontban (1,78 és 1,87 p.u.), ugyanakkor az alacsonyabb elektromágneses csatolás miatt az áramfelépülés lassabb, és a gyorsulási idő hosszabb (16,8 és 15,4 p.u.) a jobb vezetőképességű anyagoknál. Ez az ellentét a megnövekedett ellenállásból származó nagyobb indítónyomaték és az alacsonyabb áramból eredő gyengébb gyorsulási erő közötti természetes kompromisszum.

Az áramlecsengés folyamata jelzi a **szinkron üzemmódba való fokozatos átmenetet**: az elektromágneses csatolás fokozatosan gyengül, az indukált áram

stabilizálódik az üzemi értéken, és amikor a forgórész sebessége eléri a szinkron sebesség 95%-át, a motor szinkronba ugratható a gerjesztés bekapcsolásával.

A 3. ábra ezzel összhangban a szögsebesség növekedését mutatja: a réz és CCA rudakkal szerelt motorok gyorsabban érik el a szinkron sebesség 95%-át, míg a sárgaréz és bronz anyagú rudak esetében a gyorsulási idő hosszabb, ami megfelel a laposabb nyomaték-csúszás és kisebb áramértékekből adódó lassabb dinamikának.



2. ábra

Indítási áram és idő különböző rudanyagok esetében, tranziens 2-D FEM elemzéssel (ANSYS Maxwell) szimulálva közvetlen on-line (DOL) indítási körülmények között.

(Megjegyzés: Minden görbe megáll, amikor a forgórész eléri a szinkron sebességet – a Cu és a CCA éri el a szinkronizmust a leggyorsabban (≈ 10 – 11 p.u.), az Al követi, míg a CuZn és a CuSn lassabban gyorsul a nagyobb ellenállás és csillapítás miatt. Y tengely: Rotoráram I_2 (p.u.), $1,0$ p.u. = $0,67$ kA (≈ 670 A) $\rightarrow 0,1$ p.u. = 67 A; tengelyosztások $0,1$ p.u. ≈ 67 A lépések. X tengely: Idő t (p.u.), $1,0$ p.u. = $3,03$ s $\rightarrow 13,2$ p.u. ≈ 40 s a Cu referencia esetében; 1 p.u. osztás ≈ 3 s, tehát a 0 – $17,5$ p.u. tartomány lefedi ≈ 0 – 53 s valós idejű indítási időtartamot.)

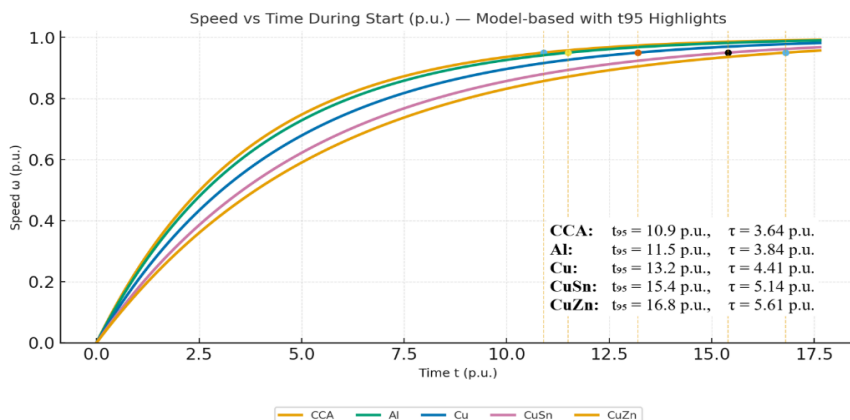
A 3. ábrán látható sebesség–idő karakterisztikák az anyag elektromos vezetőképessége, az indítónyomaték nagysága és a dinamikus gyorsulási képesség közötti összefüggést mutatják.

A nagy elektromos vezetőképességű anyagok, mint a réz (Cu) és a rézbevonatú alumínium (CCA), nagy gyorsulást biztosítanak: ezek a motorok körülbelül 10 – 11 p.u. időegység alatt érik el a szinkronsebesség 95%-át.

Az alumínium (Al) viselkedése hasonló tendenciát mutat: közepes ellenállása és kis sűrűsége miatt dinamikusan reagál, a sebességgörbéje szorosan követi a CCA esetét. Ez a kombináció kedvező elektromágneses hatékonyságot és mérsékelt termikus terhelést eredményez.

A sárgaréz (CuZn) és bronz (CuSn) rudakkal szerelt gépek ezzel szemben lassabb gyorsulást mutatnak: sebességük csak 16–17 p.u. időegység után éri el a 0,95 p.u. értéket. Ez a hosszabb gyorsulási idő összefügg azzal, hogy a nagyobb rotoellenállású anyagok a nagy csúszás tartományában kisebb gyorsító nyomatékot hoznak létre.

Ez a viselkedés jól szemlélteti, hogy a rúdanyag elektromos vezetőképessége közvetlenül befolyásolja az indítókalickás rendszer gyorsulási dinamikáját, valamint az indítási folyamat hosszát és hatékonyságát.



3. ábra

A rotor szögsebességének változása az idő függvényében a DOL indítása során, időtartomány FEM szimulációkból nyerve (ANSYS Maxwell, 50 Hz ellátás)

(Megjegyzés: Nem minden görbe végződik látható vízszintes metszettel, mert a szimuláció automatikusan leáll, amikor az egyes anyagok szinkronba kerülnek. A Cu és a CCA esetében a megoldó néhány lépéssel az állandósult állapoton túl folytatódott, lapos vonalat mutatva, míg a CuZn és a CuSn esetében pontosan a szinkronizálás pillanatában állt le. **Y tengely:** Rotor fordulatszám ω (p.u.), 1,0 p.u. = 1500 rpm $\rightarrow$ 0,1 p.u. = 150 rpm; a 0,1 p.u. tengelyosztások $\approx$ 150 fordulat/perc lépésnek felelnek meg. **X tengely:** t idő (p.u.), 1,0 p.u. = 3,03 s $\rightarrow$ 13,2 p.u. $\approx$ 40 s a Cu referencia esetében; minden 1 p.u. osztás 3 mp $\approx$, így a 0–17,5 p.u. tartomány $\approx$ 0–53 mp valós idejű gyorsulást jelent.)

4.3 Felhasznált energia összehasonlítása

A közvetlen hálózati (DOL) indítás során a szinkronmotor csillapító- vagy indítókalickájában az elektromágneses energia jelentős része hővé alakul a Joule-veszteségek következtében. Ez a hőtermelés elsősorban a rúdanyag elektromos ellenállásától és a nagyáramú tranziens időtartamától függ. Nagy teljesítményű szinkronmotorok esetében a túlzott Joule-fűtés nemcsak a rotor hőmérsékletének emelkedését okozhatja, hanem mechanikai feszültségekhez, a szigetelés öregedéséhez és a rúd-véggyűrű kapcsolatok hőterheléséhez is vezethet.

Az indítási folyamat során a pillanatnyi Joule-veszteség teljesítménye az elektromágneses alapok alapján az (8) képlettel adható meg, amely a hőfejlődés intenzitásának pillanatértékét mutatja:

$$P_J(t) = I_{\text{bar}}^2(t) R_2(T) \quad (8)$$

A kumulatív Joule-energia, azaz az indítási szakasz alatt hővé alakult összes elektromos energia a következőképpen számítható:

$$E_J = \int P_J(t) dt \quad (19)$$

ahol:

$P_J(t)$ - pillanatnyi Joule-veszteség a rotorrudakban [W]

$I_{\text{bar}}(t)$ - pillanatnyi áram a rúdvezetőkben [A]

$R_2(T)$ - hőmérsékletfüggő rúdellenállás [Ω]

E_J - az indítás során elosztott teljes Joule-energia [J]

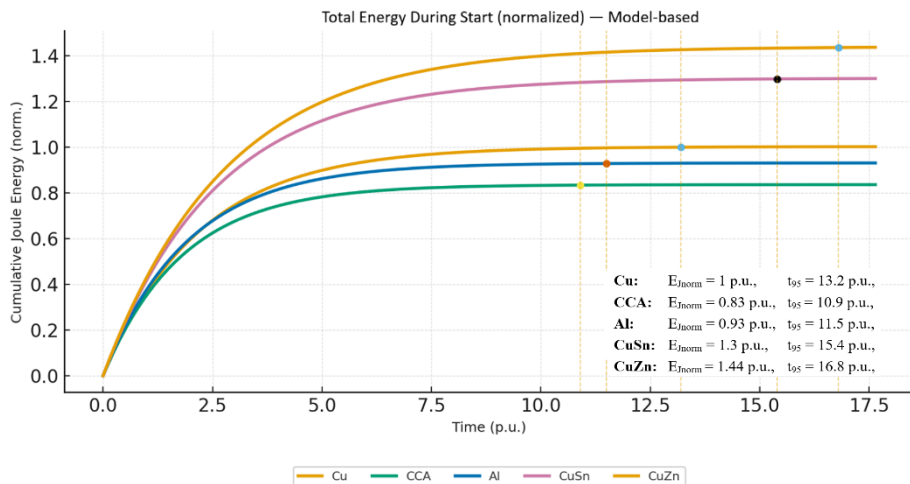
t - idő [s vagy p.u.]

A 4. ábra a különböző anyagú rudak kumulatív Joule-energiáját mutatja az idő függvényében. A görbék meredeksége azt szemlélteti, hogy milyen gyorsan alakul át az elektromágneses energia hővé a rotorban: minél meredekebb a görbe, annál intenzívebb a hőtermelés.

A sárgaréz (CuZn) és a bronz (CuSn) esetében a legnagyobb meredekség és végenergia-érték figyelhető meg, ami megerősíti, hogy nagyobb ellenállásuk miatt ezek az anyagok jelentősebb ohmos veszteséget termelnek. A réz (Cu) mérsékeltebb lejtést mutat: bár az indításkor magas áram folyik, a kisebb ellenállás és a rövidebb gyorsulási idő korlátozza a leadott hőenergia nagyságát.

Az alumínium (Al) és különösen a rézbevonatú alumínium (CCA) esetében figyelhetők meg a leglaposabb görbék, ami mérsékelt hőfejlődést és jó hőstabilitást jelez. A görbék egy-egy állandósult értékhez tartanak, amikor a forgórész fordulatszáma közelít az állórész forgó mágneses mezejének fordulatszámához, csökken a rudakban indukált feszültség és ezzel együtt a Joule-veszteség. A vezetőképesség és a sűrűség különbségei miatt a tranzienis energiafolyamatok anyagoként eltérő lefolyást mutatnak.

Ezek az eredmények összhangban állnak a legújabb FEM-alapú termikus elemzésekkel [7], amelyek szintén kimutatták, hogy a rúdanyag döntő szerepet játszik a szinkronmotor indításkori hőfeszültségeinek és hőterhelésének alakulásában.



4. ábra

Kumulatív Joule energia a kiindulási intervallum alatt, csatolt elektrotermikus FEM analízissel (ANSYS Maxwell + Transient Thermal) értékelve

(Megjegyzés: A görbék az indítás során az I²R veszteségek által termelt teljes hőenergiát mutatják. A vonalak leállnak, amikor a rotor eléri a szinkronizmust – a Cu és a CCA korábban ér véget a gyorsabb gyorsulás miatt, míg az Al, a CuZn és a CuSn több energiát halmoz fel a hosszabb indítási idő miatt. Y tengely: Kumulatív Joule energia EJ (norm.), 1,0 p.u. = EJ,Cu ≈ 12 MJ (referencia); 0,1 p.u. ≈ 1,2 MJ, 0,2 p.u. ≈ 2,4 MJ. X tengely: Idő t (p.u.), 1,0 p.u. = 3,03 s → 13,2 p.u. ≈ 40 s a Cu referencia esetében; 1 p.u. osztás ≈ 3 másodperc, tehát a 0–17,5 p.u. tartomány ≈ 0–53 másodperces valós idejű időtartamot jelent.)

4.4 Eredmények összegzése

A vizsgált rúdanyagok közvetlen és objektív összehasonlításának lehetővé tétele érdekében az analitikai és dinamikus szimulációs eredményekből egy sor kulcsfontosságú normalizált teljesítménymutatót vontunk ki.

Minden mutató a motor indítási teljesítményének és termikus viselkedésének egy adott aspektusát képviseli:

- Rotor ellenállás (R_2 , p.u.): az indítókalicka-rúd elektromos ellenállása az anyag és geometria függvénye. Magasabb R_2 → nagyobb indítónyomaték, de hosszabb gyorsulási idő és magasabb Joule-veszteség.
- Maximális elektromágneses nyomaték (M_{max} , p.u.): a szlip-nyomaték görbe csúcspontja, amely az R_2 és a forgórész reaktanciájától függ. Az alacsony R_2 anyagok (Cu, CCA) nagyobb M_{max} értékeket mutatnak (2,87 és 2,71 p.u.), azonban az indítónyomaték az $s=1$ pontban viszonylag **alacsony**. A magas R_2 anyagok (CuZn, CuSn) **nagyobb indítónyomatékot** biztosítanak ($s=1$ -nél), de

alacsonyabb maximális nyomatékcúcsot ($M_{\max} = 1,80\text{--}1,92$ p.u.). Ez a fordított viszony a szlip-nyomaték görbéről leolvasható.

- Indítóáram (I_{start} , p.u.): az állórészben az indítás kezdetén ($s=1$, álló helyzetben) felvett csúcsáram, amely az állórész impedanciája és a rotor ellenállása (R_2) kombinációjának függvénye. Az alacsony R_2 anyagok (Cu, CCA) nagyobb indítási áramot vonnak le (0,707 és 0,642 p.u.), míg a magas R_2 anyagok (CuZn, CuSn) csökkentett áramcsúcsot mutatnak (0,402 és 0,417 p.u.). Az I_{start} befolyásolja az indítónyomatékot (nagyobb áram $\rightarrow$ nagyobb indítási nyomaték) és a hálózati feszültségesést, ezért a nagy teljesítményű motorok indítási áramának korlátozása a hálózati stabilitás szempontjából kritikus.
- Gyorsulási idő (t_{95} , p.u.): az az időtartam, amely alatt a rotor a szinkronfordulatszám 95%-ára ($s = 0,05$ szlip) gyorsul fel az indítás kezdetétől. Ez az érték az indítási dinamika integráló mutatója, amely az indítónyomatékot, a veszteségeket, a hőmérsékleti hatásokat és az aszinkronos fázis teljes lefolyását magában foglalja. Az $s = 0,05$ (5% szlip) pont kritikus küszöb: az aszinkronos nyomaték már nem elegendő a további gyorsuláshoz, de a szinkronizációs erő stabil és képes a rotor szinkron sebességhez igazítására (szinkronba ugrás). Ez az érték közvetlenül jellemzi az anyagok indítási dinamikáját és szinkronizációs képességét.
- Kumulatív Joule energia (E_J , norm.): az indítási szakasz alatt a rotor vezetőiben és kapcsolataiban eloszlott összes hővé alakult elektromos energia az (17) egyenlet szerint. Ez az érték magában foglalja az ohmos veszteségeket, a szigetelés termikus terhelését és a rúd–végygyűrű kapcsolatok hőfejlődését. Az alacsonyabb E_J érték gyorsabb szinkronizációt és csökkentett rotor termikus igénybevételt jelez, amely hosszú élettartamú üzemeléshez és szigetelés-öregedés lassítása miatt fontos.

Minden mennyiséget normalizáltunk az alap 6 MW-os, 6 kV-os szinkronmotor névleges értékeire, hogy biztosítsuk az anyagok közötti teljes összehasonlíthatóságot.

Az összes anyag számított normalizált teljesítménymutatóit a II. táblázat foglalja össze, amely kvantitatív alapot nyújt mind az elektromágneses teljesítmény, mind a hőállóság értékeléséhez.

2. táblázat

A vizsgált rúdanyagok szimulációs eredményeinek összehasonlítása.

Anyag	Rotor ellenállás R_2 (p.u.)	Maximális nyomaték, $M_{\max}$, Szlip (p.u.)		Indítóáram I_{start} (p.u.)	Indító nyomaték M_{start} (p.u.)	Gyorsulási idő t_{95} (p.u.)	Joule energia E_J (norma)
		$M_{\max}$	s				
Cu	0,200	2,87	0,25	0,707	1,35	13,2	1,00
Al	0,328	2,46	0,41	0,570	1,73	11,5	0,93

CuZn	0,698	1,80	0,87	0,402	1,78	16,8	1,44
CuSn	0,640	1,92	0,8	0,417	1,87	15,4	1,3
CCA	0,245	2,71	0,31	0,642	1,53	10,9	0,83

A táblázat adatai alapján a réz (Cu) mutatja a legnagyobb maximális nyomatékot, míg az alumínium (Al) és a CCA esetében alacsonyabb veszteségek és rövidebb gyorsulási idő tapasztalható. A sárgarézt (CuZn) és bronz (CuSn) rudak magasabb ellenállása ugyan nagyobb indítónyomatékot eredményez, de ezzel együtt jelentősebb Joule-veszteséget és hosszabb gyorsulási időt is.

A CCA anyag így a legkedvezőbb kompromisszumot nyújtja az elektromágneses teljesítmény, a hőterhelés és a hatásfok szempontjából.

Az eredmények alapján a különböző kalickaanyagok eltérő indítási karakterisztikát mutatnak. A réz (Cu) esetében a legnagyobb nyomaték érhető el, de az indítási áram és a hőmérsékleti emelkedés is jelentős. Az alumínium (Al) változat kisebb nyomatékot ad, viszont kedvezőbb a termikus viselkedése. A rézbevonatú alumínium (CCA) hibrid megoldás átmenetet képez a két anyag között: az indítási energiaigény kb. 8–10 %-kal csökken, miközben az indítónyomaték csak 5–6 %-kal kisebb a rézhez képest. Ez az arány kedvező kompromisszumot jelent a nagy teljesítményű hajtások esetében.

4.5 Értékelés és ipari relevancia

A szimulációs eredmények közvetlenül alátámasztják, hogy a csillapítókalicka-anyag megválasztása meghatározza a hálózati indítás során fellépő áram- és nyomaték-tranziens nagyságát. A Ganz-nál fejlesztett 6 MW-os géptípuson végzett számítások alapján a CCA vezetőanyag alkalmazása 5–10 %-kal kisebb indítónyomatékot, ugyanakkor 15–20 %-kal alacsonyabb hőmérsékleti igénybevételt és mintegy 10 %-os anyag- és gyártásköltség-csökkenést eredményez. Ez a tendencia a nagy teljesítményű, közvetlen hálózati indítású szinkronmotorok optimalizálásának kulcsfontosságú iránya.

5 Összegzés és következtetések az anyagválasztás hatásairól

A mennyiségi összehasonlítás eredményei egyértelműen rámutatnak a nyomatékképesség, az indítási áram, a gyorsulási dinamika és a hőhatásfok közötti kompromisszumokra, amelyek meghatározzák a különböző rudanyagok alkalmazhatóságát nagy teljesítményű szinkronmotorokban:

- Réz (Cu): a legnagyobb indítási nyomatékot és áramot biztosítja, ami megerősíti kiváló elektromos vezetőképességét és magas elektromágneses

teljesítményét. Hátránya a nagy bekapcsolási áram és a mérsékelt rotorhőterhelés. Elsősorban olyan alkalmazásokban előnyös, ahol a maximális indítónyomaték a fő tervezési szempont.

- Alumínium (Al): alacsonyabb áramcsúcsot és egyenletesebb gyorsulást biztosít, miközben kisebb tömegű és kedvezőbb energiahatékonyságú. Olyan alkalmazásokhoz ajánlható, ahol a kisebb veszteség, a súlycsökkentés és a hatásfok-növelés a cél.
- Sárgaréz (CuZn) és bronz (CuSn): fokozott csillapítást és stabil szinkronizálási viselkedést biztosítanak, azonban nagyobb ellenállásuk miatt hosszabb gyorsulási időt és nagyobb hőterhelést eredményeznek. Ezek az anyagok ott alkalmazhatók előnyösen, ahol a mechanikai stabilitás és a rezgés csillapítás fontosabb a gyors dinamikus reakciónál.
- Rézbevonatú alumínium (CCA): a legkiegyensúlyozottabb teljesítményt nyújtja az összes vizsgált anyag közül. Nagy nyomatékot, csökkentett indítóáramot, rövid gyorsulási időt és alacsony hőveszteséget biztosít. A CCA ezért ígéretes, korszerű kompromisszumot jelent a nagy teljesítményű, indítókalickás szinkronmotorok számára.

Összességében az eredmények igazolják, hogy a rúdanyag megválasztása kulcsfontosságú tényező a nagy szinkrongépek indítási viselkedésének meghatározásában. Az alacsony ellenállású anyagok (pl. Cu, CCA) nagyobb nyomatékot és gyorsabb dinamikus választ adnak, míg a nagyobb ellenállású ötvözetek (pl. CuZn, CuSn) fokozott csillapítást, de nagyobb hőfejlődést eredményeznek.

Következésképpen a rézbevonatú alumínium (CCA) tűnik ki mint optimális kompromisszum a teljesítmény, a hatékonyság és a robusztusság között a közvetlen hálózati (DOL) indítási feltételek mellett [8].

A jövőbeni kutatások iránya a végelelemes módszerrel (FEM) kapott eredmények kísérleti validálása lehet kalickás szinkronmotor-prototípusok segítségével, valamint a kompozit rudak szerkezetének továbbfejlesztése a nagy hatékonyságú ipari hajtások területén.

6 Köszönetnyilvánítás

A szerző ezúton fejezi ki köszönetét a Ganz Transzformátor- és Villamos Forgógépgyártó Zrt. és az Óbudai Egyetem Kandó Kálmán Villamosmérnöki Karának a kutatás megvalósításához biztosított szimulációs környezetért, laboratóriumi infrastruktúráért és a tanulmányban felhasznált technikai erőforrásokért.

Külön elismerés illeti az Óbudai Egyetem Biztonság- és Biztonságtudományi Doktori Iskoláját a kutatási folyamat során nyújtott szakmai iránymutatásért, tudományos támogatásért és módszertani segítségért.

Források

- [1] J. Liska, **Villamos gépek III – Szinkron gépek**. Budapest: Műszaki Kiadó, 1986, 45–62. o.
- [2] S. Halász, **Villamos hajtások**. Budapest: BME, 1985, pp. 138–150.
- [3] Gy. Uray, **Villamos gépek üzeke**. Budapest: Tankönyvkiadó, 1978, pp. 97–112.
- [4] R. Rácz, **Villamos hajtások**. Budapest: BME Jegyzet, 1991
- [5] H. Liu, „Systematic Optimization Study of Line-Start Synchronous Reluctance Motor Rotor”, *Manufacturing Trans.*, vol. 13, no. 5, p. 420, 2025. MDPI+1
- [6] C. Oca, “A FEM-Based Comparative Study of the Effect of Rotor Bar and Cage Numbers Considering Al and Cu Conductors on the Performance of Asynchronous Traction Motors in Hybrid-Electric Vehicles,” *Energies*, vol. 16, no. 16, art. 6047, 2023. doi: 10.3390/en16166047
- [7] Y. R. Konda, V. K. Ponnaganti, P. V. S. Reddy, R. R. Singh, P. Mercorelli, E. Gundabattini, and D. G. Solomon, “Thermal Analysis and Cooling Strategies of High-Efficiency Three-Phase Squirrel-Cage Induction Motors — A Review,” *Computation*, vol. 12, no. 1, art. 6, 2024. doi: 10.3390/computation12010006.
- [8] G. Joksimović, “Dynamic Model of Cage Induction Motor with Number of Rotor Bars as Parameter,” *IET Journal of Engineering*, vol. 2017, no. 7, pp. 1–9, 2017. doi: 10.1049/joe.2017.0074.
- [9] M. Hyla, “Starting a High-Power Synchronous Motor with a 6-kV Voltage-Source Inverter and a Microprocessor-Controlled Excitation Unit,” *Journal of Electrical Engineering*, vol. 69, no. 2, pp. 156–162, 2018. doi: 10.2478/jee-2018-0019.
- [10] P. Schommarz and R.-J. Wang, “Development of a Transient Synchronization Analysis Tool for LSPMSM Design,” *Energies*, vol. 15, no. 23, art. 9206, 2022. doi: 10.3390/en15239206.
- [11] M. Azab, “A Review of Recent Trends in High-Efficiency Induction and Line-Start Synchronous Machines”, *Energies*, vol. 7, no. 1, p. 15, 2025. MDPI

Diagnosztikai mérések elektromos és hibrid járművek nagyfeszültségű egységein

Pátrovics Botond

Óbuda Egyetem, Bánki Donát Gépészmérnöki és Biztonságtechnikai Kar
Biztonságtudományi Doktori Iskola, Budapest, Magyarország,
botond.patrovics@cablex-group.com

Molnár György

Óbuda Egyetem, Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar, Elektrofizikai Intézet,
Budapest, 1084 Tavaszmező u. 17., molnar.gyorgy@uni-ouda.hu

Széchenyi Egyetem Apáczai Csere János Bölcsészettudományi, Pedagógiai és
Társadalomtudományi Kar, Győr, molnar.gyorgy@sze.hu

Absztrakt: Az elektromos és hibrid járművek nagyfeszültségű rendszereinek diagnosztikája kiemelt biztonságtechnikai kihívást jelent. A kutatás bemutatja a nagyfeszültségű hálózatok felépítéséből adódó sajátosságokat, valamint az ezekhez kapcsolódó általános és speciális biztonsági intézkedéseket. Kiemelt szerepet kap a feszültségmentesítés helyes sorrendje, amely minden esetben a 12 V-os kisfeszültségű rendszer megbontásával kezdődik. A nagyfeszültségű rendszerek szakszerű vizsgálata csak a hagyományos gépjármű-villamossági és -elektronikai ismeretek birtokában végezhető el. Alapvető különbség, hogy míg a kisfeszültségű hálózat a járműkarosszériát használja visszatérő vezetőként, addig a nagyfeszültségű rendszer kétvezetékes, a járműtesttől teljesen elszigetelt kialakítású. Az állandó rendszerfelügyelet minimálisra csökkenti a veszélyes testzárlatok kialakulását. A kutatás vizsgálja továbbá az emberi jelenlétből adódó kockázatok csökkentésének lehetőségeit. Ennek egyik iránya a diagnosztikai mérések részleges vagy teljes átvétele humanoid robotok által. E megközelítés hozzájárulhat a jövő járműdiagnosztikai folyamatainak biztonságosabbá tételéhez.

Kulcsszavak: nagyfeszültségű járműrendszerek, diagnosztikai mérések, elektromos és hibrid járművek, munkabiztonság és feszültségmentesítés, humanoid robotok a járműdiagnosztikában

1 Bevezető

Az elektromos és hibrid járművek nagyfeszültségű (HV – High Voltage) rendszereiben történő diagnosztikai vizsgálatokról általánosságban:

Ebben a kutatásomban az elektromos és hibrid gépjárművek nagyfeszültségű hálózatának sajátosságait szeretném bemutatni, továbbá azt, hogy ezeknek a sajátosságoknak a figyelembe vételével milyen általános és speciális intézkedéseket kell tenni annak érdekében, hogy a nagyfeszültségű rendszerekben történő diagnosztikai mérések és vizsgálatok minél biztonságosabban történjenek, továbbá azt vizsgálom, hogy melyek lehetnének azok a vizsgálatok, amelyeknél az esetleges balesetveszélyt lehetőségét úgy lehetne tovább csökkenteni, hogy a méréseket nem emberek, hanem emberek munkáját segítő és adott esetben helyettesítő humanoid robotok vehetnék át [12]. A hibrid és az elektromos hajtású járműveknél is az elsődleges villamos rendszer a kisfeszültségű, 12 V-os hálózat, ebből kifolyólag a korábbi gépjárművillamossági, gépjárműelektronikai és gépjármű informatikai ismeretek elengedhetetlenül szükségesek ahhoz, hogy valaki a nagyfeszültségű rendszerben diagnosztikai vizsgálatokat és javításokat végezhesen. Például, a tényleges feszültségmentesítést a 12 V-os kisfeszültségű akkumulátor megbontásával kell kezdeni. Az alapvető különbség a kis feszültségű és a nagyfeszültségű hálózat között abban van, hogy amíg a kisfeszültségű hálózat ugyanolyan, mint a hagyományos, korábbi, belsőégésű motoros járműveknél, azaz a járműkarosszéria (járműtest) helyettesíti a kisfeszültségű villamos hálózat vissza térő vezetékét (megspórolva ezzel a visszatérő vezetékét), addig a nagyfeszültségű villamos hálózatban mind a tápláló ág, mind a visszafolyó ág ki van építve és teljesen el van szigetelve a kisfeszültségű hálózattól. Ebből kifolyólag, valamint az állandó rendszerfelügyelet következtében annak a valószínűsége kizárt, hogy a nagyfeszültségű hálózat egyenfeszültsége a járműkarosszériára (járműtestre) juthasson és végzetes balesetet okozhasson [1] [2].

2 A nagyfeszültségű rendszerben végzendő diagnosztikai vizsgálatok

A nagyfeszültségű rendszerben végzendő diagnosztikai vizsgálatokat és javításokat három csoportba lehet sorolni:

- OBD (On Board Diagnosis – Fedélzeti Diagnosztika) műszerrel történő állapotkiolvasás, úgynevezett előadat megjelenítés – rendszerelemek értékeinek megjelenítése üzem közben.

Ebben az esetben a műszert a kisfeszültségű rendszeren keresztül csatlakoztatjuk az OBD csatlakozóra, így a nagyfeszültségű rendszerrel a diagnosztika során

semmilyen kapcsolatba nem kerülünk. A nagyfeszültségű rendszer hibakódjai 3-as számmal kezdődnek.

- Nagyfeszültségű rendszerelemekben történő közvetlen mérés, a HV rendszer feszültségmentesítése után.

Ebben az esetben, ha előzetesen a feszültségmentesítés menetét helyesen elvégeztük és vártunk néhány percet, hogy a feltöltött kondenzátorok kisüljenek, akkor is gyakorlatilag kizárt az áramütéses baleset veszélye. Viszont, ha valaki nem a HV akkumulátorok házában elhelyezett főrelék (védőrelék) szétkapcsolásával valósítja meg azt, hogy a HV akkumulátoron kívüli terület feszültségmentes legyen, hanem csak a hajtóművet kapcsolja READY állapotból OFF állapotba, akkor előfordulhat olyan állapot, hogy a hajtómű leállítása után egy hibás, összeeggett főrelé miatt a relé érintkezői zárva maradnak, így a HV feszültség megmaradhat a nagyfeszültségű áramköri elemek egy részén! [3] [4].

- A nagyfeszültségű akkumulátorokon történő közvetlen mérések, amelyeknél elkerülhetetlen, hogy a nagyfeszültségű áramkörrel közvetlen kapcsolatba kerüljünk! Az akkumulátor egységnek 60 celsius fok (333K) alatti érték fölé nem emelkedhet!

Mindenképpen említést kell tenni arról, hogy a nagyfeszültségű mérésekben történő mérések esetén mindig megfelelő szigeteléssel ellátott eszközökkel (szerszámok, műszerek, sérülésmentes védőeszközökkel) kell dolgozni és a mérések kapcsán mi az a FAM, azaz feszültség alatti munkavégzés [13].

FAM- Feszültség alatti munkavégzés: Olyan tevékenység, amelynek során a munkavégző személy a feszültség alatt álló berendezést közvetlenül, vagy szigetelt, illetve szigeteletlen szerszámmal közvetve (esetleg munkadarabbal közvetve) megérinti, az átívelési távolságon belül megközelíti, valamint a tevékenységét meghatározott térerősségű villamos térben végzi.

A FAM személyi feltételei:

- A munkavégző személyre nézve biztonságos és egészségre ártalmatlan legyen.
- A dolgozótól ne követeljen különleges szellemi és testi képességet, különleges ügyességet
- Ne jelentsen a dolgozóra nagyobb fizikai és szellemi megterhelést, mint ugyanazon munka feszültségmentes állapotban történő végzése
- Ne tegyen szükségessé különleges életkori, nemi vagy munkaidő korlátozást.
- Esetleges öntudatvesztés esetén zárja ki a dolgozó leesést
- Feszültségmentes hálózatokon végzett munkában szerzett gyakorlat
- Az elektrotechnikai és mechanikai ismeretek magas szintje
- Jelentős fizikai állóképesség

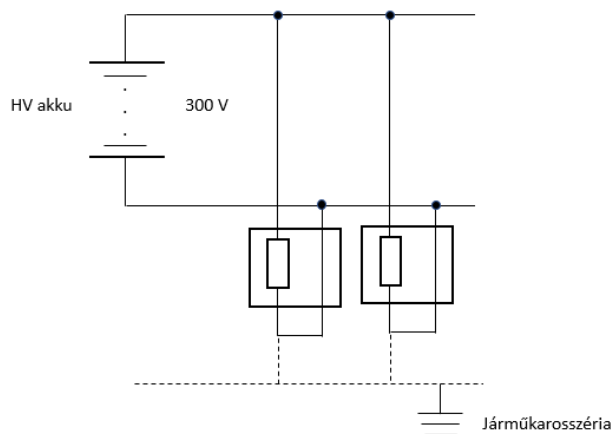
- Pszichikai alkalmasság

Munkaeszközökkel szembeni követelmények:

- mechanikai és villamos szempontból kellő biztonságu legyen
- időtálló legyen
- könnyű legyen
- mozgatusuk és kezelhetőségük praktikus és egyszerű legyen

3 A hibrid és elektromos gépjárművek nagyfeszültségű rendszerében történő diagnosztikai vizsgálatokról általánosságban

Ahogy ezt az bevezetőben említettem, a hibrid és elektromos hajtású gépjárművek független testelésű a nagyfeszültségű hálózat. Ezzel kizárható annak a lehetősége, hogy a nagyfeszültség kijuthasson a járműtestre. Továbbá egy szigetelést vizsgáló rendszer felügyeli a nagyfeszültségű és a kiskisfeszültségű áramkör egymástól történő leválasztását és a két áramköri rész közötti szigetelési ellenállás értékét. Egy másik technikai megoldás, hogy ha a járműkarosszéria részek műanyagból készülnek (pl. buszoknál), hiszen a műanyag szigetelőként szolgál, mert nem vezeti az elektromos áramot. Ez utóbbi esetben ki kell építeni a karosszérián testpotenciál pontot, vagy pontokat [5] [6].



1. ábra: A nagyfeszültségű hálózat elvi kapcsolása
(Forrás: Saját ábra)

A nagyfeszültségű rendszerben, történő diagnosztikai vizsgálatot és javítást minden esetben szigetelés vizsgálattal kell kezdeni. Ha a HV+ és a HV- pontok, valamint a jármű karosszéria test között 30V feszültségnél nagyobb a potenciálkülönbség, akkor nem megfelelő a szigetelés és vizsgálni kell, hogy a nem megfelelő szigetelésnek mi az oka. A feszültségmentesítést és a maradandó feszültség értékeket minden esetben dokumentálni kell! A kapcsolási rajzokon nagyfeszültségű rendszerekben alkalmazott nagyfeszültségű kábeleke narancssárga színnel jelölik. Feszültségimpulzus keletkezhet pl. relé ki-be kapcsolásakor [7] [8].

Ha a gépjármű kerekeit fékpadban állva a fékpadról hajtjuk, annak ellenére, hogy az inverter lekapcsolja az akkut, a forgó kerekek által fog a villamos gép forgó része forogni fog, ebből következően a mozgási indukció elve alapján visszatermelés történik. (Toyota típusú gépkocsiknál alapvetően az inverter vezérli, hogy az MG1 és az MG2 villamos gép gerjesztést kapjon.).

Ez olyan baleseti forrást hordozhat magában, hogy ha a gépjármű állandó mágnesű szinkron motorral (PMSM) hajtott, akkor az MG generátorként működik és ha a teljesítményelektronikájának nincs külön védelme, akkor a csatlakozóit megérintve fennállhat az áramütés veszélye!!! Ugyanez a helyzet fordulhat elő, ha a gépjárművet tolják vagy vontatják [9] [10].

A nagyfeszültségű villamos hálózatban történő diagnosztika és javítás előtti teendő folyamata:

- Karbantartási dokumentáció olvasás és tanulmányozása
- Védőfelszerelések vizsgálata és ellenőrzése
- Hibatároló kiolvasása az OBD műszerrel
- Gyújtás levétele, áram kikapcsolása
- 12V-os akkumulátor lecsatlakoztatása és az akku eltávolítása
- Védőkesztyű felvétele

Szervizcsatlakozó (főbiztosíték) eltávolítása és magunkhoz vétele, hogy még csak véletlenül se kerülhessen vissza a helyére a diagnosztika és/vagy a javítás befejeztéig.

A szervizkapcsoló két áramkört szakít meg. Nyitja a biztonsági áramkört és megszakítja a HV akkumulátorban elhelyezett főrelék „+” tápját, ezáltal valósul meg a feszültségmentes állapot.

Egyes járműgyártók előírják, hogy a szervizkapcsoló kikapcsolt állapotát lakatolással kell védeni.

Az előírt várakozási idő (5...10 perc) betartása, hogy a feltöltődött kondenzátorok kisüljenek.

Inverter burkolatának leszerelése

Maradandó feszültségek mérése

HV+ és HV- között: max. 0,4 V

HV+ és a járműtest között: max. 0,4 V

HV- és a járműtest között max. 0,4 V

Az akkumulátorok kivezetései az inverter felé menő csatlakozási pontokat jelenti.

Maradandó feszültség mérésekor arról lehet megbizonyosodni, hogy a kondenzátorok teljesen kisültek-e.

Karbantartás fogalma: A fenntartásnak az a részfeladata, amely magában foglalja mindazokat a ciklikusan megismétlődő műveleteket, amelyeket el kell végezni a gépkocsik megbízhatóságának és rendeltetésszerű használatának megőrzése érdekében.

Szervizkapcsoló (főkapcsoló) állapotát milliohm mérővel kell elvégezni.

Példa: Ha a gyártó 50 A-es terhelő áramerősség esetén maximum 0,05 V feszültségesést engedélyez, akkor a szervizkapcsoló maximális ellenállása: $R_{max} = 0,05 \text{ V} / 50 \text{ A} = 10 \text{ m}\Omega$.

30 V AC feszültség szint felett kell a hibrid és elektromos hajtású járművek munkaterületét a HV rendszeren történő munkavégzésre alkalmassá tenni. Az ENSZ-EGB R100 előírása szerint ezt a feszültségtartományt kell „nagyfeszültségnek = HV-nek” tekinteni.

A nagyfeszültségű rendszerekben történő mérésekhez speciális tulajdonságú voltmérőt (feszültség tesztet) használunk. Ennek az a jellemzője, hogy rendelkezik olyan önellenőrző funkcióval, amellyel tesztelni lehet a mérési folyamat bármely szakaszában (mérés előtt is) a műszer működőképes állapotát, valamint a csatlakozóik is fokozott védelmet nyújtanak [11].

A nagyfeszültségű rendszerben történő diagnosztikai vizsgálatokhoz és mérésekhez min. 750 V DC/AD mérést tudó digitális multimétert használunk. A HV akkumulátorok szereléshez használt munkaasztal lapjának szigetelőanyagból kell lennie vagy egy szigetelő bevonatot kell szerelni az asztal lapjára.

A nagyfeszültségű munkaterületet el kell keríteni, továbbá az alábbi leggyakoribb figyelemfelhívó veszélyt jelölő táblákat kell kihelyezni az elkerített területhez:

- VIGYÁZAT, NAGYFESZÜLTÉG – ÉLETVESZÉLY! feliratú tábla, valamint a
- NYÍLT LÁNG HASZNÁLATA TILOS feliratú tábla

A területet sárga illetve fekete-sárga jelzőcsíkkal is el kell látni.

A HV területen a műhelypadló nedvességének is baleseti forrása lehet, mert nem zárható ki annak a lehetősége, hogy a diagnosztikai vizsgálat és/vagy a javítás

közben a HV rendszer valamelyik csatlakozása kapcsolatba kerüljön a földpotenciállal.

A Ni-MH akkumulátorok elektrolitjának semlegesítésére az autógyártók telített bórsavat írnak elő.

Jelenleg az esetleges balesetet szenvedő szerelő mentéséhez biztonsági okokból 1,5 méter hosszúságú mentőkampó használata előírt.

A gumi védőkesztyű hibamentes állapotának ellenőrzését végezhetjük vizsgálóeszközzel, vagy úgy, hogy felfújjuk majd felcsavarással kifeszítjük és vizsgáljuk az esetleges levegő szivárgást. A védőkesztyűnek minimum 1000 V feszültségnek kell ellenállni.

Amennyiben egy akkumulátor meggyullad, CO₂-vel, N₂-vel porral vagy nagy mennyiségű vízzel elárasztva kell oltani.

HV munkaterületen célszerű az arcpajzs használata, mert zárlat során keletkező szikraeső ellen az arcunknak védelmet biztosít.

A nagyfeszültségű méréseket célszerű úgynevezett „egykezes” méréssel végrehajtani, mert ha csak az egyik kezünket használjuk a 60 V-nál nagyobb DC feszültségek mérésére, csökkenthető annak az esélye, hogy ha mégis bekövetkezik az áramütéses baleset, akkor a szívünkön át folyjon az elektromos áram, amely fokozná a baleset súlyosságát.

A HV munkaterületet ABC típusú tűzoltó berendezéssel kell felszerelni, amely az égő gázok oltására szolgál.

Az egyéni védőeszköznek nincs kihordási idejük. azokat elhasználódásuk védelmi képességük elvesztése esetén. vagy szavatossági idejük lejáratát követően soron kívül cserélni kell!

A vizsgálatot és javítást végző személyre nézve baleseti veszélyforrást jelent egy "READY"-be (menetkész üzemmódba) kapcsolt hibridhajtású jármű, mert a HV-ECU az által leállított motort bármikor visszaindíthatja, és ez balesetet okozhat.

4 Összegzés, kitekintés

A bemutatott elméleti ismeretekkel és kutatásunkkal azt mutattuk be, hogy az elektromos és hibrid hajtású járművek elterjedésével, milyen érintésvédelmi kockázatnak vannak kitéve azok a szerelők, amelyek ezeket a járműveket diagnosztizálják és javítják, illetve, hogy egy ilyen berendezés milyen mértékben óvhatja meg a szerelőt egy végzetes balesettől.

A témával a későbbiekben is szeretnék tovább foglalkozni és a berendezést tovább fejleszteni az alábbi -a kutatási folyamat során felmerült- ötletek és igények

alapján. Szeretném a berendezést védelmi funkcióját mérési funkcióval is kiegészíteni, úgy, hogy ahol megoldható és nincs a hely szűke miatt korlátozva, a nagyfeszültségű méréseket kollaboratív robotkarok által végeznék el a szerelők, tovább csökkentve ezzel az áramütés veszélyét. Ahogy a mérési folyamat során látható volt, már vannak olyan nagyfeszültségű rendszer mérések, amelyeket soros diagnosztikai műszerrel el lehet végezni. Vélhetően ebbe az irányba fog tovább fejlődni a technika és egyre több ilyen rendszervizsgálat lesz, azonban bizonyos, hogy a meghibásodott rendszerelemek javításakor elkerülhetetlen lesz a nagyfeszültségű hálózatba történő közvetlen beavatkozás.

Továbbá a másik távlati cél, hogy minél több hibrid és elektromos jármű nagyfeszültségű rendszerének javítási folyamatát megismerhessem, ezáltal minél több olyan hibalehetőséget feltárjunk, amelyekre további egyéb biztonsági berendezések kifejlesztését lehetne megvalósítani. Korábban a polaritás felcserélhetőségének problémájáról nem hallottam, de a napi szintű javításokat végző kollégák elmondása szerint ez nem járműspecifikus, hanem általános probléma a többi hibrid és elektromos hajtású járművek javítása esetén is..

References

- [1] https://kossuth.hu/electude/sco2022.13.2g5e29d9233/module_3247_1115_005113853271], letöltés dátuma: 2022.10. hó
- [2] <https://www.villanylap.hu/lapszamok/2013/szeptember/2527-az-elektromos-aram-emberre-gyakorolt-hatasai>, letöltés dátuma: 2024.09. hó
- [3] https://kossuth.hu/electude/sco2022.13.2g5e29d9233/module_3247_1115_005113853271], letöltés dátuma: 2022.10. hó
- [4] https://kossuth.hu/electude/sco2022.13.2g5e29d9233/module_3247_1115_005113853271, letöltés dátuma: 2022.10. hó
- [5] <https://hs.nisshamedical.com/en/ecg-electrodes/versatrode-electrodes-uk>, letöltés dátuma: 2023.04. hó
- [6] https://kossuth.hu/electude/sco2022.13.2g5e29d9233/module_00003232_11150051, letöltés dátuma: 2022.10. hó
- [7] Modulo C68e (Midi autóbusz) javítási útmutató

- [8] https://kossuth.hu/electude/sco2022.13.2g5e29d9233/module_3225_11150051, letöltés dátuma: 2022.10. hó
- [9] <https://www.valence.com/stackable-modules-12-819v>, letöltés dátuma: 2024.09. hó
- [10] <https://fr.rs-online.com/web/p/connecteurs-circulaires-industriels/1879793>], letöltés dátuma: 2024.09. hó
- [11] Alternatív járműhajtási technikus képzés jegyzete (2022/2023)
- [12] Ali, A. R. – Kamal, H. (2025). Time-to-Fault Prediction Framework for Automated Manufacturing in Humanoid Robotics, Technologies, Vol. 13, Art. 42 (MDPI)
- [13] Agrawal, V. K. et al. (2025). Safety challenges in high-voltage electric vehicle systems: risks and design strategies, Discover Electronics (Springer Nature), Vol. 2, Article 53

Adatbáziskezelés oktatása tükrözött osztályterem módszerrel

Pátrovics Botond

Óbuda Egyetem, Bánki Donát Gépészmérnöki és Biztonságtechnikai Kar
Biztonságtudományi Doktori Iskola, Budapest, Magyarország,
botond.patrovics@cablex-group.com

Molnár György

Óbuda Egyetem, Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar, Elektrofizikai Intézet,
Budapest, 1084 Tavaszmező u. 17., molnar.gyorgy@uni-ouda.hu

Széchenyi Egyetem Apáczai Csere János Bölcsészettudományi, Pedagógiai és
Társadalomtudományi Kar, Győr, molnar.gyorgy@sze.hu

Az adatbáziskezelés oktatása a felsőoktatásban kiemelt jelentőségű, mivel a hallgatóknak nemcsak elméleti ismereteket, hanem erős gyakorlati kompetenciákat is el kell sajátítaniuk. A tükrözött osztályterem (flipped classroom) módszer hatékony pedagógiai megközelítést kínál e cél eléréséhez. A módszer lényege, hogy az elméleti tananyagot a hallgatók önállóan, jellemzően digitális tananyagok (videók, jegyzetek, interaktív modulok) segítségével dolgozzák fel az órák előtt, míg a kontaktórák a gyakorlati feladatok megoldására, problémamegoldásra és konzultációra fókuszálnak. Adatbáziskezelés esetén ez különösen előnyös, hiszen az SQL-lekérdezések, adatmodellezési feladatok és adatbázis-tervezési esettanulmányok elsajátítása aktív tanulási környezetben a leghatékonyabb. A tanár szerepe mentorálónak és facilitálónak alakul, miközben a hallgatók aktívabb részvételt és nagyobb felelősséget vállalnak saját tanulásukért. Kutatások szerint a tükrözött osztályterem módszer növeli a tanulási motivációt, javítja a gyakorlati teljesítményt és elősegíti a mélyebb megértést az informatikaoktatás területén. Az adatbáziskezelés oktatásában alkalmazva a módszer hozzájárul a munkaerőpiacon is jól hasznosítható kompetenciák fejlesztéséhez.

Kulcsszavak: adatbáziskezelés, tükrözött osztályterem, flipped classroom, informatikaoktatás, aktív tanulás, felsőoktatási módszertan

1 Bevezető

A fordított oktatás (flipped classroom) módszertani megoldás kialakulása az online tömeges tanulási környezetek és rendszerek (MOOC) beindulásával és elterjedésével egyidős. A módszer hatékonysága MOOC orientált környezetekben (Khan, edX, Coursera, Udacity) már az elmúlt néhány évben empirikus úton is bizonyítást nyert [1]. Nemzetközi kutatások értelmében, bizonyítást nyert, hogy a fiatalabb generációk számára a játékszoftverek alkalmazása kézenfekvő megoldás, de a hatékonyság vizsgálata nehézségekbe ütközik [2], míg más kutatók [6] [7] megállapították, hogy a tanulók képességeinek fejlesztésére és az ismeretek átadására megfelelőek és hatékonyak a digitális játékok. Az utóbbi néhány évben Magyarországon is megjelent a fordított oktatás, vagy tükrözött osztályterem módszere. A fordított oktatásban előzetes házi feladatként a tanuló előre megnézi a felvett tanári videókat, így órákon a tudás mélyítésére, interaktív feladatokra lehet fókuszálni [8]. A módszer első kidolgozói és első dokumentálói: Jonathan Bergmann és Aaron Sams voltak [9-11]. Első körös alkalmazása sportesemények miatti hiányzások pótlása érdekében valósult meg. A tükrözött osztályterem módszerének alkalmazásához azonban különféle oktatásszervezési [12] tantervelméleti és módszertani átalakításokra is szükség van, ahogyan arra hazai kutatók is rámutattak [13]. Emellett az érintett szereplőket is fel kellett készíteni a helyzet kezelésére (Engler, 2020). Mindezen feladatok némiképpen kompenzálhatóak megfelelő együttműködésen alapuló projektjellegű oktatási forma bevezetésével [14].

2 A fordított tanterem jellemzői, kapcsolódó szakmai kutatások

Napjainkban az oktatás egyik fő problémája általánosságban, hogy egy adott feladat megoldására a tanórán az időkeret túl szűkös, így akár emiatt, vagy más okból (pl. hiányzás, vagy elmaradt órák miatt) a tanulók lemaradnak, és ebből kifolyólag felzárkóztatásra szorulnak, amely további idővesztéssel jár és maga a felzárkózás ideje is tanulónként különböző időigényű. Erre jelent megoldást a tükrözöttosztályterem módszer.

A tükrözött osztályterem egy újfajta oktatási modell, amely az oktatás online formában történő megjelenésével és egyre nagyobb térhódítása által nyert létjogosultságot és szintén egyre növekvő jelentőséggel bír, azáltal, hogy megvalósulhat a komplex és hibrid oktatás [3].

„A „tükrözött osztályterem” ötvözi a hagyományos tantermi, kontakt órás oktatást és a távoktatást, kihasználva a mindkettőben rejlő lehetőségeket. A modell jellemzője, hogy a tanulók otthon, a számítógépükön keresztül készülnek fel a kontakt órákra.” [4].

Abban az esetben, ha a tanóráról videófelvétel készül, a tanulók az iskola falain kívül, akár otthonukban is tudnak készülni a soron következő kontakt órákra. Az elkészített oktató videóban felsorolt, az adott tanóra témájához tartozó irodalmak megfelelő idejű tanulmányozásával, az irodalomhoz kapcsolódó esetleges gyakorló feladatok megoldásával és esetleges új feladatok konstruálásával kellően tudják gyarapítani az addig megszerzett ismereteiket. Ebben az esetben az időkorlát szinte végtelen, mindenki annyit tud gyakorolni, amennyit szükségesnek érez. Szakmai oktatásban az esetleges interaktivitás megvalósításával a motiváció tovább növelhető (pl: „itt most állítsuk meg a videó lejátszását és csak akkor indítsuk újra, ha előtte megválaszoljuk az alábbi kérdést...”). [5].

A tükrözött osztályterem módszer, által a pótlások idejét jelentősen lecsökkenthetjük, továbbá nemcsak az adott órai feladat többszöri megtekintésére és begyakorlására ad lehetőséget, hanem a tanulási folyamat során felmerülő kérdések is sokkal hamarabb megválaszolásra kerülhetnek. Sőt a rögzített anyag mintájára, akár saját maguk által kreált gyakorló feladatok megalkotására és megoldására is lehetőség adódik. A tükrözött osztályteremben mindenki a saját tempójában tud haladni, ami nemcsak pótlást, hanem egyfajta előkészületi munkát tesz lehetővé a következő oktatási alkalomra, tanórára. Ez a módszer egyszerre szolgálja a felzárkóztatást és a tehetséggondozást is, hiszen a gyorsabban haladó, vagy akár a nagyobb érdeklődésű tanulók számára további, bonyolultabb feladatok megoldást is egyszerre lehetővé teszi, miközben, akik lassabban haladnak, azoknak lehetőségük van kérdezni anélkül, hogy a többieket hátráltatnák a haladásban. Ezekre a sajátosságokra több hazai és külföldi kutató is rámutatott [15- 19].

3 A fordított tanterem módszer használatával kapcsolatos módszertani kérdések és alkalmazási lehetőségek

Esettanulmányunkban azt mutatjuk be, hogy egy vállalati tréningorozat során hogyan valósítottuk meg az oktatást tükrözött osztályterem módszerrel. A folyamat azzal kezdődött, hogy a cégünknel több irodai dolgozó jelezte azt az igényét, hogy amennyiben lehetőség lenne rá, szeretne részt venni egy táblázatkezelő és egy arra épülő adatbáziskezelő tréningen. Ennek kapcsán kialakítottam egy ütemtervet, amely azt tartalmazta, hogy a 28 órás táblázatkezelő, illetve a szintén 28 órás adatbázis kezelő tanfolyamnak milyen főbb témakörök lennének. (A 28 óra felosztása: 6*4,5 óra+2 óra modulzáró vizsga) A főbb témaköröket úgy állítottuk össze, hogy a képzések mindkét esetben az alapoktól indultak. Ennek kapcsán többen jelezték, hogy bizonyos szintű ismeretekkel már rendelkeznek, de a későbbi modulokra szeretnének becsatlakozni, ha lenne erre lehetőség. Ennek következményeként merült fel a tükrözött osztályterem módszere, azaz, hogy az oktatási órákat rögzítjük és feltöltjük a vállalati hálózati

meghajtóra, hogy a becsatlakozni kívánók folyamatosan kontrollálni tudják, hogy az aktuális modulokon éppen milyen anyagrészeket veszünk. Továbbá voltak olyan kollégák is, akik a munkahelyi elfoglaltságaik, vagy előre betervezett szabadságuk miatt nem tudtak részt venni bizonyos oktatási alkalmakon (az oktatások munkaidőben zajlottak), viszont szerették volna végig járni a tanfolyamot, amelynek a végén modulzáró vizsgát lehetett tenni. Sikeres modulzáró vizsga esetén, pedig oklevelet kaptak. A rögzített órák mellett gyakorló feladatokat is megosztottam a vállalati hálózaton, így a tanfolyamon részt vevő kollégák, feladatmegoldás és a tanóra megtekintése során felmerülő kérdéseiket folyamatosan el tudták nekem juttatni. A gyakorló feladatokat nyers és kidolgozott formában is megosztottam. Az oktatások alkalmával próbáltam a hatékonyságot tovább fokozni, így amikor időm lehetővé tette, az egyes modulokból az elkészített tanórák videói mellé készítettem olyan oktató videókat, ahol a modulok során megoldott feladatokat én magam egyedül oldom meg, mintegy előadást tartva, ahol csak egyirányú kommunikáció zajlik. A visszajelzések szerint ezek a videók tovább növelték az oktatások hatékonyságát azáltal, hogy a modulonkénti kb. 205 percet összesűrítettem kb. 1,5 óra (90 perc) terjedelembre. Természetesen ezek a jóval rövidebb videók rendszerezettebben összefoglalták azokat a témaköröket, amelyeket az oktatási alkalmakon átvettünk, továbbá előfordult olyan is, hogy ezeken a videókon még további részletekre is volt lehetőségem kitérni, mert nem voltam semmilyen időkorlátokhoz kötve. Továbbá a videók mellé feltöltöttem az adott modulokhoz tartozó nyers és kidolgozott feladatokat, feladatokat is, így ha valaki az önálló megoldás folyamatában valamelyik ponton elakadt, akkor a kész, kidolgozott feladat, valamint az órákon megoldott feladatok alapján (amelyekről a videofelvétel készült) az esetek túlnyomó többségében, önállóan, tanári segítség nélkül is tovább tudtak lépni.

Megítélésünk szerint annak van leginkább értelme adatbáziskezeléssel foglalkozni, aki a táblázatkezeléssel, a táblázatkezelő funkciójával (szűrés, keresés, rendezés, kimutatások stb.), a táblázatkezelő adatbáziskezelő függvényeivel és azoknak rendszerével, logikájával teljesen tisztában van. Tehát az adatbáziskezelés a táblázatkezelésre nagyon szorosan épül. Az adatbáziskezelő tréningen egy adott feladat megoldásánál többször visszaadtam a táblázatkezelőben tanultakra, sőt, ha időkeretünkbe belefért, akkor ellenőrzésképpen megcsináltunk pl. egy lekérdezést az adatbáziskezelés mellett a táblázatkezelőben is. Ennek azért volt a tréningorozat során kiemelt jelentősége, mert voltak olyan kollégák, akik a táblázatkezelő programokat olyan szinten ismerték és használták, hogy nekik már meg volt a kellő ismeretük és jártasságuk ahhoz, hogy rögtön az adatbáziskezelő tanfolyamon kezdjenek. Mindenkinek, aki közvetlenül az adatbáziskezelő tanfolyamra jelentkezett, azaz a táblázatkezelő tréning nélkül, meg kellett oldani egy olyan táblázatkezelési feladatsort, amely az alapját képezte az adatbáziskezelő képzésnek. Ha ezt valaki nem tudta teljesíteni, akkor ez semmilyen problémát nem okozott, hiszen bármikor megtekinthette az előző, táblázatkezelő tréninghez készített oktató videókat és gyakorló feladatokat. Ugyanezt megtehetette az is, aki nem volt tisztában azzal, hogy a táblázatkezelő

ismeretei milyen szinten vannak. Továbbá volt még egy további érdekesség is, amelyet szintén a tükrözött osztályterem módszer eredményezett. Voltak olyan kollégák, akik nem akarták az egész kurzust végig járni, viszont bizonyos modulokon, amelyekkel nagyon sokat dolgoznak a napi munkájuk során, mint például a kimutatások készítése, szerettek volna részt venni. Természetesen a férőhelyek száma korlátozott volt, ezért azt nem lehetett kivitelezni, hogy például az első modulon csak 7-8 fő vegyen részt, a következőn, ahol ezt a bizonyos előbb említett kimutatásokat vettük, azon pedig kb. 20 fő lehessen. Ebben az esetben is a rögzített és a vállalati hálózati meghajtóra feltöltött videók és a velük kapcsolatos gyakorló feladatok jelentették a megoldást, hiszen ezekhez az anyagokhoz a vállalon belül bárki bármikor hozzáférhetett, aki a cég alkalmazottja volt és a hálózat használatára egyébként is jogosultsággal rendelkezett.

Egy idő után felmerült annak az igénye is, hogy ezzel a tükrözött osztályterem módszerrel lehetne-e készíteni olyan oktató videókat, amelyek kimondottan projektfeladatok és egyben szakmaspecifikusak is. Ez is nagyon jó ötlet volt, mert a kollégák, akik a tréning résztvevői voltak, több területről érkeztek, így például volt, akit kimondottan logisztikai projektfeladatok érdekelték, volt, akiket gépjárműtechnikai projektfeladatok és volt, akit gazdasági projektfeladatok. De volt arra is példa, hogy olyan kollégák kerestek meg különböző területekről pl: ESH, HR), akik új belépő kollégáknak tartott oktatásokat és azokhoz az oktatásokhoz tartozó ismeretanyag digitalizálásához volt szükségük olyan új ismeretekre, amelyek által új digitális alapú kérdőíveket tudnának összeállítani és a kiértékelésük is digitális formában történne meg. Az eredményeket pedig egy adatbázisban tárolnák el. Az így összegyűjtött igények alapján a tanfolyami tananyagokon túl készítettünk speciális projektek megvalósításáról szóló oktató videókat.

A tanfolyamok tematikája az alábbi struktúrát követte:

- **Táblázatkezelő tanfolyam**

- o 1. modul: A táblázatkezelő felépítése, szerkezete.
- o 2. modul: Egyszerű matematikai és logikai műveletek. Számítás tömbképlettel.
- o 3. modul: Cellák formázása, relatív és abszolút hivatkozások. Rendezés, szűrés
- o 4. modul: A táblázatkezelő főbb függvényei: SZUM, ÁTLAG, MIN, MAX, HA, SZORZATÖSSZEG, DARAB, DARAB2, DARABTELI, DARABÜRES, FKERES, VKERES, INDEX, HOL.VAN, SZUMHA, ÁTLAGHA, SZUMHATÖBB, ÁTLAGHATÖBB, GYAKORISÁG
- o 5. modul: Gyakorló feladatok megoldása függvények alkalmazásával
- o 6. modul: Diagramok szerkesztése, kimutatások(pivot táblák) készítése

- o Modulzáró feladat

- **Adatbáziskezelő tanfolyam**

- o 1. modul: Az Excel program adatbáziskezelő függvényei: AB.SZUM, AB.ÁTLAG, AB.MAX, AB.MIN, AB.DARAB, AB.DARAB2
- o 2. modul: Adatbázistervezés lépései- kimutatás orientáltság, több objektum logikai összekapcsolása
- o 3. modul: Az Access adatbáziskezelő felépítése, szerkezete.
- o 4. modul: Táblák létrehozása, több tábla logikai összekapcsolása
- o 5. modul: Lekérdezések létrehozása
- o 6. modul: Űrlapok létrehozása jelentések készítése
- o Modulzáró feladat

- **Speciális projektfeladatok**

- o Módszeres hibakeresési ok-okozati adatbázis (hibajelenség-hiba oka)
- o Alkatrész mozgásokat tartalmazó adatbázis és a mozgásokra vonatkozó kimutatások
- o Adott típusú karbantartásoknál elvégzendő tevékenységek adatbázisa
- o Munka- és balesetvédelmi tanfolyam érvényességét nyilvántartó adatbázis
- o Auditálására felkészítést segítő adatbázis
- o Új belépő oktatást segítő tesztek
- o Költségkalkulátor készítése
- o Optimumszámítás a SOLVER program használatával

4 Összegzés, kitekintés

A jövőbeli oktatási módszertanban a fordított osztályterem és a tükrözött osztályterem megközelítések szerepe tovább fog növekedni, különösen a digitális átalakulás és az Ipar 5.0 kihívásai miatt. Az adaptív tanulási rendszerek és a mesterséges intelligencia integrációja lehetővé teszi az oktatás személyre szabottabbá tételét, valamint a teljesítményértékelés automatizálását, objektívvá és

folyamatossá tételét. A mesterséges intelligencia nemcsak a tartalomfejlesztésben és a tudásértékelésben nyújt támogatást, hanem képes előre jelezni a tanulási nehézségeket és ajánlani a megfelelő tanulási utakat is. A gamifikáció és az élményalapú technológiák, mint például a VR és az AR, új dimenziókat nyitnak meg a motiváció és az interaktivitás terén, különösen a gyakorlati készségek fejlesztésében és a motiváció fenntartásában [20] [21].

A digitális platformok globális hozzáférést biztosítanak, lehetőséget teremtve a nemzetközi együttműködésre és a tudásmegosztásra. Ez különösen fontos a vállalati képzések és a felsőoktatás területén, ahol a résztvevők gyakran eltérő időbeosztással és előzetes ismeretekkel rendelkeznek. Ugyanakkor a technológiai infrastruktúra hiánya, az adatbiztonsági kérdések és a társadalomban fennálló digitális szakadék továbbra is komoly kihívásokat jelentenek. A tanárok és a diákok digitális készségeinek fejlesztése elengedhetetlen, mivel az új módszerek sikeres alkalmazása csak megfelelő felkészüléssel érhető el.

A jövőbeli kutatások egyik kulcsfontosságú területe az lesz, hogy a szemeszter során olyan optimális módszertani egyensúlyt alakítsanak ki, amely figyelembe veszi a diákok előzetes ismereteit, érdeklődési körét és tanulási stílusát. Fontos feladat a projektalapú és adaptív oktatási modellek harmonizálása, valamint az önszabályozó tanulást és a kompetenciafejlesztést támogató digitális eszközök kidolgozása. A fordított és tükrözött osztálytermi módszerek kombinációja, kiegészítve mesterséges intelligenciával és tapasztalaton alapuló technológiákkal, hosszú távon rugalmas, személyre szabott és hatékony tanulási környezetet teremthet, amely képes alkalmazkodni a gyorsan változó gazdasági és technológiai környezethez.

References

- [1] Molnár, György A COVID-19 világjárvány idején a digitális szabadulósobák segítségével megvalósított, fordított tanuláson és tapasztalati tanítási módszereken alapuló oktatás, In: Karlovitz, János Tibor (szerk.) Szakmai módszertan és pedagógiai tanulmányok a világjárvány idején, Komárno, Slovakia: International Research Institute 2021, pp. 479-486. , 7 p.
- [2] Young, M. F., Slota, S., Cutter, A. B., Jalette, G., Mullin, G., Lai, B., Simeoni, Z., Tran, M., & Yukhymenko, M. Our princess is in another bcastle: A review of trends in serious gaming for education. Review of Educational, Research, 2012, 82 (1), pp 61-89.
- [3] <https://www.oktatas2030.hu/outdoors-program-bejegyzes-cime/> - 2025.10.23-i letöltés

- [4] <https://www.uni-corvinus.hu/downloads/30dz.58vy0g/tukrozott-osztalyterem.48d.pdf> -2025.10.23-i letöltés
- [5] <https://hirmagazin.sulinet.hu/hu/pedagogia/a-forditott-osztalyterem-alkalmazasa> 2025.10.23-i letöltés
- [6] Sitzmann, T. A meta-analytic examination of the instructional effectiveness of computer-based simulation games. *Personnel Psychology*, 2011, 64, pp. 489-528.
- [7] Wouters, P., & Van Oostendorp, H. A meta-analytic review of the role of instructional support in game-based learning. *Computers & Education*, 2013, 60, pp. 412-425.
- [8] Sams, A., & Bergmann, J. Flip Your Students' Learning. *Educational Leadership*, 2013, 70 (6), pp. 16-20.
- [9] Foertsch, J., Moses, G., Strikwerda, J., & Litzkow, M. Reversing the lecture/homework paradigm using eTEACH web-based streaming video software. *Journal of Engineering Education*, 2002, 91 (3), pp. 267-274.
- [10] Moore, D., Edwards, S., Cutter-Mackenzie, A., & Boyd, W. (2014). Play-Based Learning in Early Childhood Education. In *SpringerBriefs in Education, Book Series*, 2014, Vol. 169, pp. 9-24.
- [11] G. Halász, " Flipped Learning (Fordított tanulás). Esettanulmány az oktatási innovációk megjelenésének és terjedésének dinamikájáról, 2016. [Kézirat]. Letöltés http://flippedlearning.org/wp-content/uploads/2016/07/FLIP_handout_FNL_Web.pdf [2025.12.02].
- [12] J. T. Karlovitz, A világjárvány mint lehetőség az oktatási és képzési intézmények szervezeti fejlesztésére. Torgyik, Judit (szerk.), *Társadalmi felelősség és társadalmi gondolkodás 2020*, pp. 130-136. Grosspetersdorf, Austria: Sozial und Wirtschafts Forschungsgruppe.
- [13] V Vass, A tanulás reneszánsza. *Magiszter*, 2019, 17 (2), 4-14.
- [14] Á. Engler, A távoktatás a családok szemszögéből. *Civil Szemle, Special Issue* (1), 2020, pp. 115-131.
- [15] A. Kövári (2017). Költséghatékony informatikai eszközökkel támogatott projektalapú oktatás. Julianna Mrázik (szerk.), *Új tanulási módszerek 2017*, 273–284. o. Budapest: Magyar Oktatás- és Képzési Kutatók Társulása..
- [16] Molnár, György, The role of electronic and virtual learning support systems in the learning process, In: Szakál, Anikó (szerk.) *8th IEEE International*

- Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics (SACI 2013), New York, Amerikai Egyesült Államok : Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) (2013) 488 p. pp. 51-54. , 4 p.
- [17] A. Kovari, "Digital Transformation of Higher Education in Hungary in Relation to the OECD Report," in DIVAI 2022, 2022, pp. 229–236.
- [18] A. Bacsá-Bán, I. András, Technikusképzéstől a szakmaipedagógusképzésig: ÚSR a Dunaújvárosi Egyetemen, CIVIL SZEMLE 19 : 4 pp. 137-147., 2022
- [19] Molnár, György, A technológia és hálózatalapú alapú tanulási formák és attitűdök az információs társadalomban, különös tekintettel a felsőoktatás bázisára, Információs Társadalom: Társadalomtudományi folyóirat 12:3 pp. 61-77., 17 p. (2012)
- [20] András, Benedek; György, Molnár; Zoltán, Szűts, Practices of Crowdsourcing in relation to Big Data Analysis and Education Methods, In: Szakál, Anikó (szerk.) SISY 2015: IEEE 13th International Symposium on Intelligent Systems and Informatics: Proceedings September 17-19, 2015, Subotica, Serbia, New York, Amerikai Egyesült Államok : Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) (2015) 329 p. pp. 167-172. , 6 p.
- [21] M. Rajcsányi-Molnár, L. Balázs, I. András, S. Czifra, Competition as an Effective Motivational Tool in Online Education, In: Szakál, Anikó (ed.) IEEE 11th International Conference on Computational Cybernetics and Cyber-Medical Systems, ICCM 2024 : Proceedings, IEEE Hungary Section pp. 83-88., 2024

A Simplon alagút vasútvonal villamosítása Kandó Kálmán háromfázisú rendszerével

Dr. Jeszenszky Sándor

Dr. Jeszenszky Sándor Ernő, nyugdíjas, Orlay u.4. 1114 Budapest, Magyarország,
jeszi@qwertynet.hu

Absztrakt: A Simplon vasúti alagút, amely Olaszországot Svájjal köti össze, 1906-ban nyílt meg. 70 évig ez volt a világ leghosszabb vasúti alagútja. A cikk bemutatja az olaszországi Valtellina vonal villamosítását háromfázisú rendszerrel, amelynek tervezője Kandó Kálmán, kivitelezője a budapesti Ganz gyár volt. Ennek sikere alapján határozták el a Simplon vasútvonal Kandó rendszerű villamosítását. Az első mozdonyt a Valtellina vonaltól vették kölcsön, de a svájci BBC hamarosan megépítette saját mozdonyait. Néhány megoldása különbözött a Kandó mozdonyokétól, de alapelvük ugyanaz volt. Kettős felsővezeték, a mozdonyban elhelyezett háromfázisú motorok és rudazat hajtású kerekek, Kandó háromszöggel.

Kulcsszavak: Háromfázisú mozdony, kettős felsővezeték, aszinkron kaszkád, vízindító, rudazat hajtás, Kandó-háromszög

1. Bevezetés, áttekintés

Kandó Kálmán munkásságát leginkább villamos mozdonyaihoz kapcsolják. Ennél ő sokkal többet tett, ő honosította meg a háromfázisú rendszert Magyarországon.



1. ábra:

A dupla Simplon alagút bejárata, 3 fázisú, kettős felsővezetékkel

A váltakozóáram már az első elektromágneses áramfejlesztő, Pixii 1832-es állandó mágneses generátora óta ismert volt, de a galvánelemek korában gyakorlati célokra alkalmatlannak tartották. Minden villamos készülék, csengő, távíró és telefon, villanymotor, akkumulátor, galvanizáló berendezés egyenárammal működött. Pixii gépét Ampère tanácsára egyenirányító érintkezőkkel (kommutátorral) látta el.

Az áramellátás legnagyobb tekintélye Edison volt, aki mereven kitartott az egyenáram mellett, a nagy városok villamosítása az 1880-as években egyenárammal történt.

A váltakozóáram úttörője a Ganz gyár és mérnök-hármasa, Zipernowsky, Déri és Bláthy volt, találmányuk a zárt vasmagú transzformátor és a nagyfeszültségű, a felhasználóknál párhuzamosan kapcsolt feszültségcsökkentő transzformátorokkal történő áramelosztás tette lehetővé a villamosenergia nagy távolságú szállítását. Rendszerük egyfázisú volt, ami kielégítette az izzólámpás és ívlámpás világítási igényeket. 1885-ben mutatták be a budapesti Országos Iparkiállításon. A kiállítás világítása megfelelt egy korabeli kisvárosénak. 1886-ban a Ganz egyfázisú váltakozóárammal építette meg Róma villamos hálózatát, 1892-ben pedig a világ első, állandó üzemű távvezetékét a Római Höerőmű és a Tivoli Vízerőmű között, szinkron üzemmódban. Az elosztás 2000 V-os táphálózattal, 2000/100 V-os transzformátorokkal történt. Az 1.440 kW-os erőmű a világ élvonalába tartozott. A következő 10 évben a Ganz világszerte több, mint 160 áramfejlesztő telepet épített. Megkezdődött ez egyenáram és a váltakozóáram harca.

Az egyenáram és a váltakozóáram harcában az egyenáram fő előnye az addigra már magas szintre fejlesztett egyenáramú motor, hátránya a nagyon gazdaságtalan energia továbbítás volt. Egy áramfejlesztő telep csupán pár száz méteres körzetet

tudott ellátni, ami a nagyvárosokban komoly környezetszennyezési bajokat okozott. Az egyfázisú váltakozóáram előnye a gazdaságos energia átvitel volt, de hiányzott a megfelelő motor.



2. ábra:

Tesla tárcsa motor másolata a Deutsches Museumban

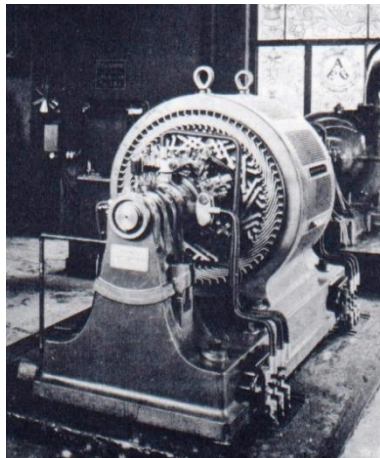
Nikola Tesla 1882-ben Budapesten jutott el a többfázisú energiaátvitel gondolatáig, kommutátor nélküli indukciós motorral. Elgondolását azonban nem hozta nyilvánosságra. Az Egyesült Államokba utazott, ahol Edison munkatársa lett, aki közismerten váltakozóáram ellenes volt. Kivált Edison cégéből, és önálló kutatóként találmányát 1887-ben szabadalmaztatta. Később Westinghousenek, a váltakozóáram amerikai úttörőjének adta át a gyártás jogát.

Tőle függetlenül Galileo Ferraris 1885-ben kétfázisú motort mutatott be, de csak 1888-ban publikálta. Az indukciós motor hatásfokát Ferraris tévesen csupán 50%-ra becsülte, ezért továbbfejlesztésével nem foglalkozott.



3. ábra Kétfázisú Ferraris motor másolata a Deutsches Museum-ban

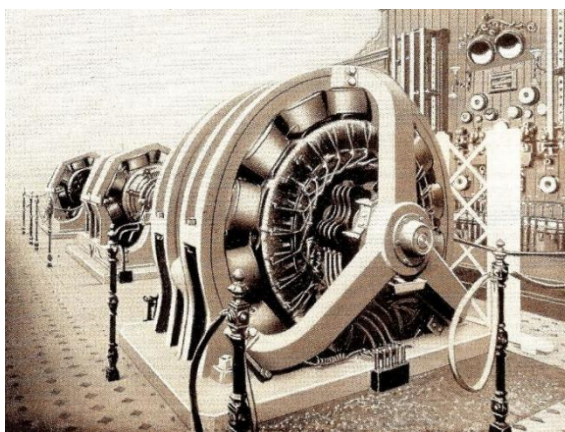
Az elv megvolt, de gyakorlati megvalósítására az 1891-es Frankfurter Nemzetközi Elektrotechnikai kiállításon került sor. A motor konstrukció Michael Dolivo-Dobrowolskyhoz, az AEG mérnökéhez fűződik. Az AEG és a svájci Oerlikon, a későbbi BBC 175 km hosszú 15kV-os háromfázisú távvezetékkel hozta az energiát a Lauffeni Vízermőtől a kiállításon levő 100 LE-s aszinkron motorhoz. Ott mesterséges vízesést működtetett, a közbeszéd szerint 3 szál vezetéken elhozták a lauffeni vízesést Frankfurtba. A kiállítás után azonban a távvezetékét lebontották.



4. ábra: Frankfurt, 1891, 100 LE-s aszinkron motor

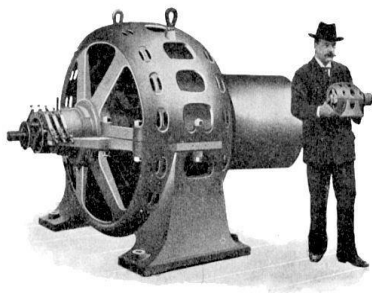
1893-ban, Budapest közcélú áramszolgáltatása kezdetén a főváros villamosítása a már általánosan alkalmazott egyenáram és az új váltakozóáramú rendszer összehasonlításának nagy léptékű kísérlete lett.

A Ganz egyfázisú rendszert épített, ennél nem volt probléma, hogy erőművet már nem lehetett a belvárosban építeni. Elosztó hálózatának feszültsége 3000 V volt. De ugyanez a követelmény vonatkozott az egyenáramú rendszerre is. Ott a megoldás az volt, hogy nagyfeszültségű váltakozóárammal jutott az energia a motor-generátoros egyenirányító alállomásokba. Ez azonban már kétfázisú, 1800V-os 26 Hz-es rendszer volt, az alállomásokon aszinkron motorokkal. Az első alállomás a Kazinczy utcában volt. Bár az egyenáram már kezdett avulttá válni, az erőmű és az egyenirányító állomás közötti kapcsolat korszerűbb volt, mint az egyfázisú, transzformátoros Ganz rendszeré. A Schuckert cég építette.



5. ábra: Kétfázisú aszinkron motorral hajtott dinamók a Kazinczy alállomáson

A transzformátor és a transzformátoros nagyfeszültségű áramelosztás feltalálói mégis idegenkedtek az új innovációtól, a többfázisú váltakozóáramú rendszertől. A Ganz vezérigazgatója, Mechwart András ezért hazahívta párizsi Fives-Lille cégnél háromfázisú motorokat tervező 25 éves Kandó Kálmánt, aki 1895-ben megtervezte az első F motorsorozatot, és megkezdődött a gyártás. Az „F” forgóáramot jelentett, a német Drehstrom fordítását. Ma már inkább az aszinkron elnevezést használjuk, hiszen nem az áram, hanem a gép mágnes mezeje forog. A motorok 15 típusnagyságban készültek, 1 – 100 LE teljesítmények között, rövidrezárt vagy csúszógyűrűs forgórészsel.



6. ábra: Kandó motorok

Az eredmények Kandó figyelmét a nagyvasúti villamosításra irányították. Megállapította, hogy ez alapvetően eltér a városi villamosoktól, és gazdaságosan csak nagyfeszültségű táplálással, aszinkron motorokkal üzemeltethető,



7. ábra: Kandó aszinkron motoros kísérleti kocsija

Ehhez járul, hogy lejtmenetben az aszinkron motorok külső beavatkozás nélkül generátoros féküzemben működnek. A kísérleteket már 1896-ban megkezdte.

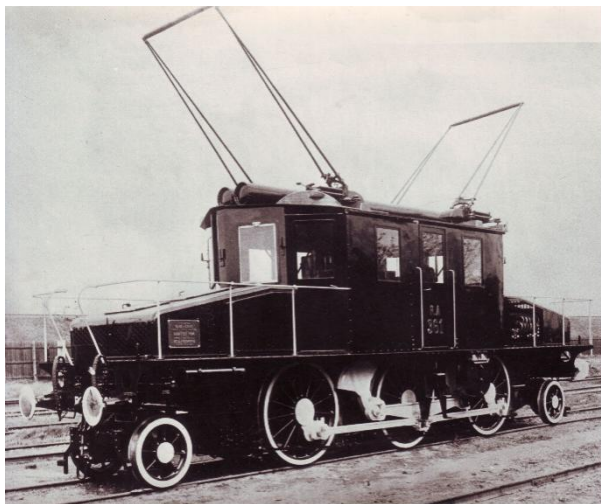
Ezek alapján vállalkozott 1899-ben Kandó, illetve a Ganz a Comói tó melletti, 106 km-es, alagutakkal, emelkedőkkel teli Valtellina vasút villamosítására. Ez volt az első „igazi” nagyvasút villamosítás. 1902-ben megindult az üzem. A vontatás a kis teherforgalmú, elsősorban idegenforgalmi célokat szolgáló vonalon RA 34 sorozatú, egy sebességű tehervonati mozdonyokkal (29 km/óra) és a személyszállítás motorkocsikkal történt, két sebesség fokozattal, aszinkron kaszkád illetve közvetlen táplálású motorokkal. (32 és 64 km/óra). A kaszkád hajtás akkoriban újdonságnak számított. A motorok közvetlenül hajtották a

kerekeket, közös, de a motorok rugózott felfüggesztését lehetővé tevő csuklós tengelyekkel. A távvezeték feszültsége 22 kV, frekvenciája 15 Hz volt, a felsővezetékét transzformátorral 3000V-tal táplálták. Az energiát a Morbegnói vízerőmű szolgáltatta.



8. ábra: RA 34-es mozdony a milánói Leonardo da Vinci múzeumban, már nem az eredeti, hanem BBC áramszedőkkel felszerelve

1904-ben a Ganz igényesebb, RA 36 sorozatú, 2 sebességű (31 és 62 km/h) mozdonyokat szállított, ezeken már megvolt a háromfázisú Kandó mozdonyok minden jellegzetes megoldása. Ismeret a teljes siker. Mégis, mivel a Hitelbank a Ganz mozdonyépítést banki szempontok miatt nem támogatta, a Ganzban a mozdony gyártás megszűnt. Olaszországban, Vado de Liguréban épült mozdonygyár, Kandó Kálmán vezetésével. Több, mint 700 további típusú, de azonos rendszerű Kandó mozdonyt gyártottak, 1700 km-t villamosítottak háromfázisú Kandó rendszerrel. Az olaszok büszkén Systema Italianának nevezték.



9. ábra

A Valtellina vonal RA 363-as mozdonya, eredeti áramszedőkkel

Az azonban kevésbé ismert, hogy Svájcban a Gothard alagút forgalma a Valtellinától kölcsönként 363-as mozdonnal indult 1906-ban, majd a svájci BBC gyártott részleteiben eltérő, 364 és 365 számjelű, de Kandó rendszerű mozdonyokat, majd további típusokat fejlesztett ki, de változatlanul Kandó alapelveit követve. Így Olaszország után Svájcban is megjelentek a Kandó mozdonyok.

Az Olaszországot Svájjal összekötő Gothard alagút a kor mérnöki csúcsteljesítménye volt. Építése 1899-ben kezdődött és 6 évig tartott. Korábban is épültek vasúti alagutak, de egy 3000 méteres heglánc alatt 20 km-es alagút építése rendkívüli követelményeket támasztott. Kőomlások, vízbetörések, 60 fokos hőmérséklet – mindez csekély átszellőzés mellett. A munkának 30 halálos áldozata volt. 70 évig ez volt a világ leghosszabb vasúti alagútja. Az első kísérleti meneteknél még gőzmozdonyt használtak, de bebizonyult, hogy gőzzel a rendszeres üzem megvalósíthatatlan. Érdekes, hogy a villamosítást svájci cégek kezdeményezték, saját költségükre. Ez a befektetés később bőven megtérült.

A különleges körülményekre való tekintettel a legmegbízhatóbb, kipróbált rendszer jöhetett számításba. A már 4 éve tökéletesen működő Valtellina vonal bebizonyította a háromfázisú rendszer megbízhatóságát, mellette döntöttek.

Ez a döntés érdekes, mert Svájc akkor már megkezdte a vasútvillamosítást AEG rendszerű, 15kV egyfázisú, 162/3 Hz-e, kommutátoros mozdonyokkal. De az egyfázisú rendszert Svájcban még csak elkezdték alkalmazni, nem volt kellő tapasztalat, és hátránya volt, hogy visszatáplálósósféközme még nem volt. Az egyfázisú kisfrekvenciás rendszer az AEG befolyású területeken máig megmaradt,

bár a mai, áramirányítós, több-áramnemű mozdonyokat a kontinentális 50Hz-cel is lehetne táplálni – de az átalakítás nagy költséggel járna.

Magyarországon a vasútvillamosítás 1932-ben a Kandó által tervezett 16kV-os, 50Hz-es, egy fázissal táplált fázisváltós, aszinkron motoros mozdonyokkal kezdődött. Ez a háromfázisú rendszer továbbfejlesztett változata volt – a mozdonyban levő forgógépes fázisváltóval. Ma a Kandó rendszer reneszánszát éljük, aszinkron motorokkal, egyfázisú, 25kV, 50Hz táplálással, de forgógépes fázisváltó helyett teljesítményfélvezetős áramirányítóval. Erről a külföldi technikátörténet elfeledkezik, a mi feladatunk, hogy megőrizzük emlékét.

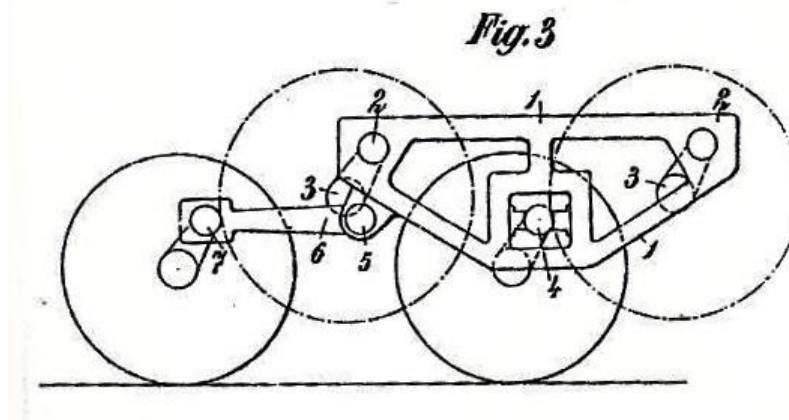
Milyen volt az RA 363-as mozdony, és miben különböztek a BBC mozdonyok?

Kandó alapelvei a következők voltak:

3 fázisú, aszinkron motoros hajtás.

3000V körüli felsővezeték. A kettős felsővezeték miatt a feszültséggel nem lehetett feljebb menni. Két fázisvezeték, a harmadik fázis a sín.

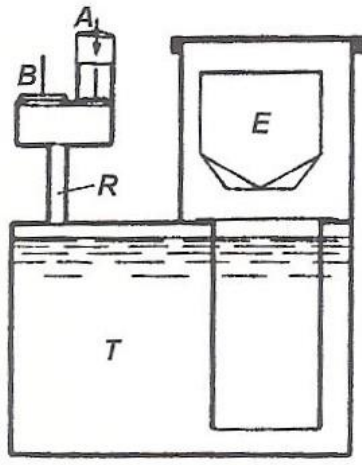
Közvetlen, fogaskerék hajtómű nélküli hajtás. A mozdonyban elhelyezett két alacsony fordulatszámú motor rudazattal hajtotta a kerekeket. A rugózott hajtómotorok és a rugózatlan kerekek közötti kapcsolatot és a forgatónyomaték egyenlő átvitelét Kandó találmánya, a Kandó-háromszög és kulisszás hajtómű tette lehetővé.



10. ábra:Kandó háromszög

Az alacsony fordulatszám érdekében volt a frekvencia 15Hz. Ez teljesen más ok, mint a kommutátoros egyfázisú motoroknál a $162/3$ Hz, amit a kefe szikrázás elfogadható mértékűre csökkentése tett szükségessé.

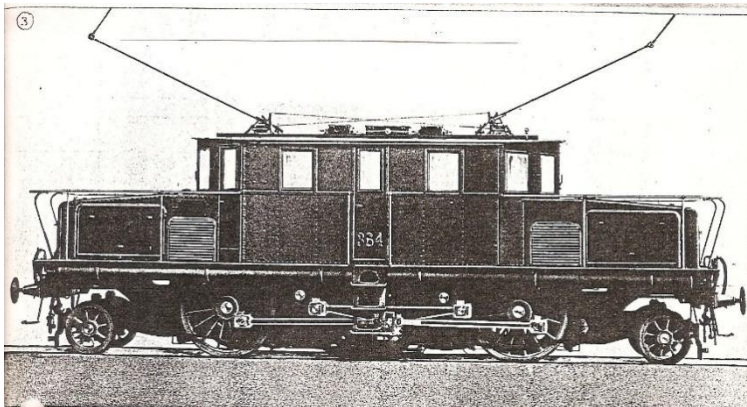
A sebességváltást a két motor kaszkád-kapcsolása tette lehetővé. Az indítás és a fokozatok közötti sebesség szabályozása pneumatikus (sűrített levegős) szintszabályozású vízindítóval történt. Ez folyamatos átmenetet és mágnesszeleppel önműködő áramszabályozást tett lehetővé.



11. ábra: Folyamatosan szabályozható ellenállású vízindító

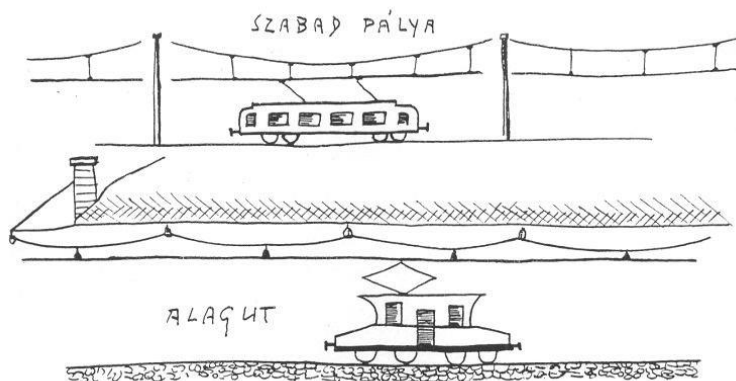
Mi változott a BBC mozdonyain?

Hasonlítsuk össze az RA 363-ast a BBC 364, 365 mozdonyaival



12. ábra: BBC gyártmányú, de folyamatosan számozott, 364-es mozdony

Ami azonnal feltűnik: az áramszedő. A Valtellinán a próbáknál sorozatosan törtek az áramszedők – de csak az alagutakban. Okát Kandó munkatársa, Tóth László derítette ki és talált rá megoldást. Tóth rajza mindent megmagyaráz: a szabad szakaszokon a felsővezeték függesztése hosszú rugalmas vezetékkel történt, ez kivédte a lengéseket. Az alagutakban a függesztés merev volt, ez okozta az áramszedő lengését. Megoldásként az alagutakban is hosszirányú tartókábelt alkalmazott.



15. ábra: Tóth László rajza

A hosszú Simplon alagútban ez nem volt megoldható, ezért a BBC az áramszedők végére rugalmas áramszedő-keretet szerelt. Ez annyira bevált, hogy Kandó átvette.

A frekvenciát 162/3Hz-re, a feszültséget 3300V-ra növelték, ez semmi változtatást nem igényelt

A motorok elhelyezése és a közvetlen, Kandó-háromszöges rudazat hajtás megmaradt.

A sebességváltás nem kaszkád kapcsolással, hanem pólusátkapcsolással történt.

A BBC későbbi mozdonyain a sebességváltás több lépcsős pólusátkapcsolással történt, 4 sebességgel (37,5, 50, 75, 100 km/h). A pólusátkapcsolást részben Kandó is átvette 1907-től.

A BBC a vízindító helyett fém ellenállásokat használt, több megcsapolású transzformátorral. Kandó megmaradt az egyszerű és folyamatosan szabályozható vízindítónál, ezt alkalmazta a későbbi, magyarországi fázisváltós mozdonyoknál is.

A BBC későbbi mozdonyainál is megmaradt a közvetlen rudazatos és Kandó háromszöges hajtás mellett, de a teljesítmény növelése érdekében a motorok után fogaskerékes hajtóművet épített be.

A svájciak a vonalat később meghosszabbították és 15 évig volt üzemben. Azután áttértek a Svájcban már elterjedt és bevált egyfázisú, 162/3 Hz-es 15 kV-os rendszerre. 1918-tól megoldották az egyfázisú visszatáplálásos fékezést. Északolaszország hegyvidéki vonalain viszont a háromfázisú Kandó rendszer egyes vonalai 70 évig üzemeltek.

Figyelemre méltó, hogy Kandó 3-fázisú rendszerét Svájcban is alkalmazták, a BBC gyártotta, és a szakmai kapcsolat a svájciak és Kandó között kétirányú volt.

Összefoglalás: A Svájcot Olaszországgal összekötő Simplon alagút vasútvonalának 1906-os megnyitásakor az Olaszországban már bevált háromfázisú Kandó rendszert alkalmazták, majd a mozdonygyártást a BBC is átvette.

Köszönetnyilvánítás: Köszönetemet nyilvánítom Fojtán István (Magyarország) és Hugo Wyss (Svájc) uraknak a cikk írásához nyújtott segítségért.

Források:

- [1] Fojtán István: Kandó mozdonyok, Magyar Vasúttörténeti Park Alapítvány, Budapest 2019, pp.41-62, 69-100.
- [2] Elektrotechnik und Maschinenbau: L. von Verebely: Elektrische Vollbahntraction in Italien, Wien, 1919 mai. 18, Heft 20, 37 Jahrgang, pp.209-216.
- [3] Sándor Jeszenszky, Antonio Savini, Hugo Wyss: The innovative three-phase electrification of the Simplon tunnel, IEEE, Svájc, 2025. pp.1-5.
- [4] Horváth Tibor, Jeszenszky Sándor,, A magyar elektrotechnika története, Magyar Elektrotechnikai Egyesület, Budapest, pp.104-110.
- [5] Elektrotechnika: A Simplon vasút új mozdonyai, lapszemle E. u. M. 1908. I. 12, Magyar Elektrotechnikai Egyesület, Budapest, 1908 febr. 1, p.13.

Az ún. “második vészhelyzet” biztonságos megoldhatóságának kérdése katonai légijárművek ejtőernyős vész-gépelhagyási folyamata során

Szaniszló Zsolt

Szaniszló Zsolt, 5008. Szolnok Kilián György utca 1/B. 4. em. 8. ajtó [Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Műegyetem rkp. 3, 1111, Budapest, Magyarország], sunnyboymi24@gmail.com

A katonai repülést sokan kifejezetten veszélyes. míg mások legfeljebb kockázatos tevékenységnek gondolják. Az igazság valahol a kettő között van. Azért, hogy ez a nagyon szép hivatás megmaradjon a legfeljebb kockázatos besorolású szinten, a repülő-hajózó személyzetek részére speciális személyi- és kollektív védő-, illetve mentőberendezéseket, továbbá azok készség szintű alkalmazására megfelelő felkészítést kell biztosítani! Ehhez egyértelmű írott-, és íratlan szabályokra, példaértékű vezetői (parancsnoki) hozzáállásra van szükség, amelyek – természetesen a repülési feladat előírás szerű végrehajtása mellett – elsődlegesen mind a repülést végrehajtó személy biztonságát tartják a legfontosabbnak!

Kulcsszavak: az ún. “második vészhelyzet”; katapultálás; ejtőernyős vész-gépelhagyás

1 Bevezetés

Korábbi élethivatásom szoros kapcsolatban állt a magyar katonai repülő-hajózó állomány repülési feladatai végrehajtásának egyik alapfeltételét jelentő minden oldalú biztosítással, amely – akkor még – a végrehajtást elrendelő személy, illetve szervezet felelősségi körébe tartozott. Ennek minél alaposabb megismerése céljából – egyebek mellett – tudományos kutatómunkát is végeztem a pilóta mentő-ejtőernyőkkel és katapultülésekkel kapcsolatosan.

A II. világháború lezárása óta eltelt 8 évtized alatt a Magyar Néphadsereg (MN), majd a Magyar Honvédség (MH) több –, különféle repülésre veszélyes helyzetbe került – repülőgép- és helikopter-személyzetének tagja hagyta magára járművét a levegőben, életét a személyi mentőejtőernyőre bízva. Ennek során az ún. “második vészhelyzet” nevű jelenség több személynél is bekövetkezett, amely halálos kimenetellel is járt... Jelen publikációm ebbe nyújt részleges betekintést.

2 A fogalomtisztázás fontossága...

Ezen publikáció valódi tartalmát akkor és csak akkor fogja megérteni olvasója, amennyiben megfogadja az alábbi ókori, kínai filozófiai gondolatokat:

*„Ha a szavak használata nem helyes, a fogalmak értelme zavaros;
ha a fogalmak értelme zavaros, nem lehet szabatosan cselekedni;
ha nem lehet szabatosan cselekedni, a nép nem tudja, hová lépjen és mit tegyen.
Minden ezen múlik.”*

(Konfuciusz)

Vagyis: a publikáció első részét a fogalmak tisztázásának szentelem.

A múltban a katonai repülés, valamint ejtőernyős pályafutásom során minden feladat –, amelynek részese voltam – egy ún. feladattisztázással kezdődött, amelynek fontosságát – elsősorban az akkori résztvevők közül – alapvetően senki sem kérdőjelezte meg... Előfordulhat ugyan, hogy ez egy “kívülálló” szemében, “apróság”-nak tűnhet, de a jelen publikáció okán én mégis erre helyezem a fő hangsúlyt, visszaemlékezve “aktív időszakom”-ra, amikor a “*Mission first, safety always!*”¹⁶ még nagyon komoly tartalmat hordozott magában... Alapvető kell(ett), hogy legyen az adott feladattal kapcsolatos bármilyen “apró” részlet minden résztvevő számára pontosan azonos és egyértelmű jelentése: a biztonságos (repülési) feladat végrehajtásnak ez és csakis ez lehet(ett) az alapja!

Kezdjünk is bele a publikáció tárgyát bevezető fogalmak tisztázásába!

2.1 A biztonság fogalma

Mielőtt belekezdnenék az ún. “második vészhelyzet”-fogalom megismerésébe, először még három másik szakkifejezést kell tisztáznunk, amellyel a számunkra fontos fogalom [1] – még a repülésben kevésbé jártas érdeklődők számára is – megérthetőbbé válhat.

„A biztonság a latin „securitas” szóból eredően, egyszerűen megfogalmazva bizonytalanság nélküli állapotot jelent.”

(Dr. Kiss Sándor mk. alezredes)

A repüléssel kapcsolatosan is – miután az emberi közlekedés a szárazföld, majd a tenger után a levegő óceánjára, vagyis a levegőre is kiterjedt – megjelent az ember részéről az annak biztonságos végrehajtására vonatkozó igény, amely elvezetett a repülésbiztonság tudományához!

¹⁶ Az Amerikai Egyesült Államok Légierője Repülésbiztonsági Főnökség (United States (of America) Air Force Safety Command) egyik jelmondata.

2.2 A repülésbiztonság fogalma

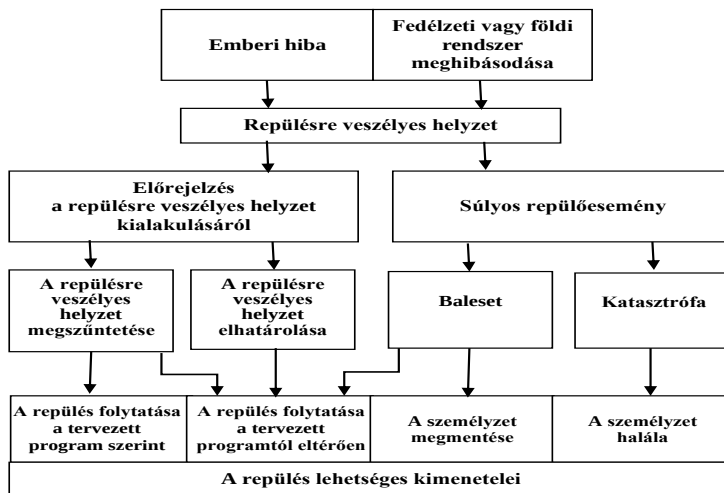
A repülésbiztonság önmagában is bonyolult tudományterületet jelent, amelyet megpróbálok viszonylag egyszerűen szemléltetni, az alábbiak szerint:

“A biztonságos repülés nem más, mint komplex emberi tevékenység eredményeként – a levegőben való mozgás során – létrehozott, adott feltételek között optimális működőképességi, valamint valószínűségi állapot.” [2].

De úgy is megfogalmazhatjuk: a repülésbiztonság valójában nem jelent mást, mint az ún. „ember-gép-környezet” kapcsolat egyik legbonyolultabb formáját: magát a repülőgépezető (RGV.) vagy a helikoptervezető (HV.) komplex tevékenységének folyamatát, amelyben a repülés – gyakorlatilag – megvalósul.

2.3 A repülésre veszélyes helyzet fogalma

Az ún. “második vészhelyzet” fogalom eredetének és jelentésének tisztázása előtti utolsó szakkifejezés létrejötté önmagában szünteti meg a biztonságos repülés tényét: ez nem más, mint a repülésre veszélyes helyzet [3], amely – két okból kifolyólag(!) – a teljes repülési folyamat során gyakorlatilag bármely pillanatban kialakulva, mindösszesen négy lehetséges kimenetellel végződhet (1. ábra).



1. ábra

A repülésre veszélyes helyzet kialakulásának okai és négy lehetséges következménye

Az előző ábrából látható, hogy minden egyes repülési feladat nem végződhet sikeresen..., amihez azt is érdemes hozzáfűzni: a sikeres feladatvégrehajtás fogalma – az elmúlt időszakban – részben relativizálhatóvá vált!

Személy szerint sikernek “könyvelem el” azt is, amennyiben a repülés lehetséges négy kimenetele közül “csak” a harmadik, vagyis a személyzet megmentése valósul meg, ... de természetesen nem mindegy, hogy milyen áron!

Mert pl. hogyan is kell kezelnünk azt az esetet, amikor a repülésre veszélyes helyzetbe került pilóta elhagyja ugyan a további repülésre véglegesen alkalmatlanná vált légijárművét, – vagyis úgy tűnik, hogy ilyen módon “sikerült” a gyakorlatban is megoldani a repülési vészhelyzetet, – azonban a személyi mentőeszközének – egyébként előírászerű – alkalmazása során könnyű, vagy esetlegesen súlyos (maradandó) sérülés éri?

A halálos kimenetelű ejtőernyős vész-gépelhagyás lehetőségét már meg sem említem...

3 Az ún. “második vészhelyzet”

Arra a jelenségre, amelyre jelen publikációmban az ún. “második vészhelyzet” kifejezést alkalmazom, korábban alapvetően repülésbiztonsági vonatkozású cikkekben utaltak, és kizárólagosan a légijármű fedélzetén bekövetkező és ott, az adott helyen(!) megoldandó repülésre veszélyes helyzetet értették alatta.

3.1 Az ún. “második vészhelyzet” fogalma

A fogalom, illetve a mögötte álló jelenséggel kapcsolatos hipotézis arra utal, hogy a RGV. vagy a HV. – alapvetően pszicho-fiziológiai okokra visszavezethetően, elsősorban kimerültség vagy rossz figyelemmegosztás miatt – a másodjára jelentkező, repülésre veszélyes helyzettel már képtelen lesz megbírkózni, [4] amely így irreverzibilis (visszafordíthatatlan) módon a légijármű lezuhanásához, vagyis katasztrófához fog vezetni! Ettől a fogalomtól fogunk – részben – eltérni!

Mivel jelen publikáció kifejezetten a repülésképtelenné vált légijárművek vész-gépelhagyására koncentrál, így a RGV. vagy HV. számára az ún. “második vészhelyzet” nem a légijármű fedélzetén következik be, hanem már a levegőben, miután katapultüléssel vagy anélkül, de elhagyta azt abból a célból, hogy pilóta mentőejtőernyője segítségével érjen földet. Vagyis: tulajdonképpen megoldott egy repülésre veszélyes helyzetet azzal, hogy vész-gépelhagyást hajtott végre..., így a már “a magára hagyott” légijármű fülkéjén kívül, a levegőben “leselkedő”, majd jelentkező vészhelyzet kizárólagosan már a második lehet, illetve lesz “a sorban”!

És ha ott nincsenek meg a túlélés feltételei, a következmények egyértelműek...

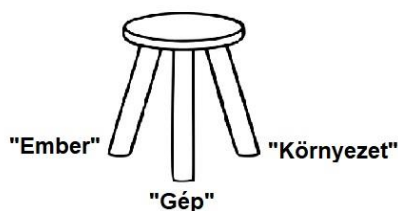
3.2 Az ún. “második vészhelyzet” kimenetele: mi vár(hat) a pilótára az ejtőernyős vész-gépelhagyást követően a levegőben? És mi vár(hat) rá a földön?

Nagyon sok minden! De azt kell alapul venni, hogy a pilóta számára az adott helyzetben ez az egyetlen egy esély az életben maradásra, így a hibázás lehetősége már nem szabad, hogy “opciós” maradjon, sem neki, sem más résztvevőnek...!

“Mit is értek fogalma alatt?”

(Cziffra László okl. mk. ezredes)

A légijármű teljes ejtőernyős vész-gépelhagyási folyamata biztonságos végrehajthatóságának valamennyi részletét –, vagyis mindenféle bizonytalanságot, amely a pilótában esetlegesen annak pozitív kimenetével kapcsolatosan ún. “averzió”¹⁷-t kelthet – érdemes egy speciális nézőpontból, a korábban már említett, ún. “Ember-Gép-Környezet” rendszer (2. ábra) alapján megvizsgálni!



2. ábra

Az ún. “Ember-Gép-Környezet” rendszer szemléltetése

A fenti ábra egy olyan háromlábú széket ábrázol, amelyben – az “Ember”-t, a “Gép”-et és a “Környezet”-et szimbolizáló – mindhárom székláb a talajon stabilan állva a teljes személyi ejtőernyős vész-mentő rendszer tökéletes egyensúlyát garantálja: a “szék” biztosan –, vagyis bizonytalanság-mentesen (!) – áll a földön!

Most vizsgáljuk meg egyenként a “széklábak”-at!

3.2.1 A “Gép” szerepe

Amennyiben az adott légijármű sem – kezdettől – a megépítése, sem – utólag (!) – az üzemeltetése során nem kerül felszerelésre vészhelyzeti ejtőernyős mentőberendezéssel, az rejtetten (!) már önmagában hordozza a katasztrófát. (Ebben az esetben a szék egyik legfontosabb lába hiányzik...)

¹⁷ A pszichológiában alkalmazott szakkifejezés az “Ember” adott dologgal kapcsolatos elkerülő magatartásra utal, amely a publikáció tárgya okán az ejtőernyős vész-gépelhagyás lehetőségének elutasításával –, vagyis a repülésképtelenné vált légi-járműben maradással – növeli a pilótahalál bekövetkezésének valószínűségét.

3.2.2 Az “Ember” szerepe

Egy ejtőernyős vész-gépelhagyási folyamat biztonságos végrehajthatósága szempontjából a két legfontosabb dolog, hogy az alkalmazó személy:

1. részéről legyen meg a bizalom a személyi ejtőernyős mentőeszköze iránt, vagyis: a biztos tudat, hogy az működni fog, ha szükség lesz rá,
2. rendelkezzen általánosságban az ejtőernyős ugrás végrehajtásával, továbbá speciálisan az adott típusú személyi ejtőernyős mentőeszközzel kapcsolatos szakszerű ismeretekkel, elsősorban gyakorlati jártassággal.

Ne felejtjük el: a világ legbiztonságosabb(nak vélt) mentőberendezése sem fogja tudni megmenteni az őt alkalmazó életét, amennyiben az nincs rá felkészítve, illetve felkészülve, [5] ugyanis a személyi mentőberendezések közül – bár érdemes lenne – nem mindegyiket tervezték fél-, majd teljesen automata (vagyis az alkalmazója akaratától, aktív cselekedétől független) működtetésűre. (Ebben az esetben a szék másik legfontosabb lába hiányzik...)

3.2.3 A “Környezet” szerepe

Mivel minden műszaki berendezésnek vannak üzemeltetési korlátai, így a személyi ejtőernyős mentőberendezésekkel kapcsolatosan a “Környezet” alatt az ejtőernyő, vagyis a “Gép” kupolájának biztonságos belobbanásához szükséges vész-gépelhagyási (repülési) magasság-, illetve sebesség paraméterek meglétét, annak “tiszteletben tartása”-t (biztosítását) értem az alkalmazója részéről. Így szoros kapcsolatban kell, hogy legyen az “Ember”-rel is, amely ha nem áll fenn, akkor... (Ebben az esetben a szék harmadik legfontosabb lába hiányzik...)

“Természetesen” vizsgálhatjuk azt is, hogy az ejtőernyős vész-gépelhagyás békeidős vagy háborús viszonyok között¹⁸ (“műveleti” (ellenséges), illetve “saját” (hazai hátországi) terület fölött) kerül végrehajtásra, de ez már az ún. “harmadik, negyedik stb. vészhelyzet”-et fogja jelenteni. (Itt már az ún. “szerencse-faktor”-ra is szükség lehet, amely alapvetően a teljes vész-gépelhagyási folyamat utáni időszakra vonatkozik majd, az ejtőernyős földet érést követően...)

A fentiekből látható, hogy a “három székláb” mindegyike fontos szerepet kap a sikerben. Lehetne vizsgálni azt is, hogy ezek közül legalább a “Gép” is akkor és csak akkor “áll stabilan a földön”, ha az azzal kapcsolatos valamennyi(!) feladatot egy másik, ugyancsak “háromlábú szék”, vagyis: a “Gyártó” és az “Üzemeltető vagy Üzembentartó” és a “Hatóság”-hármasa szakszerűen biztosít! De ez már egy másik tanulmány tudományos vizsgálatának tárgyát jelentené...

¹⁸ Kifejezetten érdekes statisztikai adat, hogy háborús helyzetben a pilóták hamarabb hozzák meg a vész-gépelhagyásra vonatkozó döntést, még akár ellenséges terület fölött is!

4 Az ún. “második vészhelyzet” és a magyar katonai repülés kapcsolata

A magyar katonai repülés történetét már számos hadtudományi-, illetve katonai műszaki szakember vizsgálta különböző szempontok alapján. Repülésbiztonsági, azon belül az ún. “második vészhelyzet” bekövetkezése okainak vizsgálati szempontja egy teljesen új megközelítést jelent, így a ténszerűség betartása miatt kutatásom ún. “alaphalmazá”-t egy bizonyos időszakra korlátoztam le.

4.1 Az ún. vizsgálati “alaphalmaz”

Olyan ténszerűnek vett információkat – amelyek egy hasonló publikáció, vagy majd egy nagyobb kiterjedésű tanulmány forrásanyagát jelenthetik, – alapvetően csak a magyar katonai repülés 1945-től napjainkig tartó időszakára találtam.

Jelen publikációmban ezek közül most három eset-példa kerül bemutatásra!

4.2 Három példaeset az ún. “második vészhelyzet”-re a magyar katonai repülés modernkori történetéből

4.2.1 Katapultálás MiG-21 PF típusú vadászipülógépből (1968.01.30.)

Kóro István repülő őrnagy (1931-1968) (3. ábra) a MN 47. Honi Vadászipülő Ezred – Pápa – 407-es fedélzeti számú MiG-21 PF típusú vadászipülőgéppel, 1968. január 30-án, profilaktikus javítás utáni berepülést végzett.

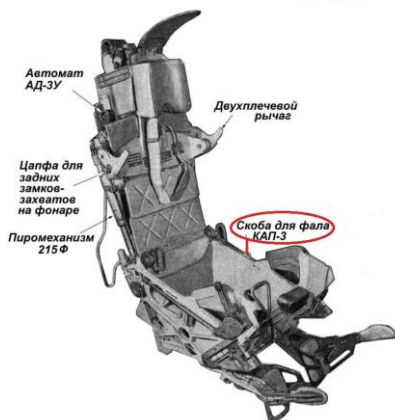


3. ábra

Kóro István repülő őrnagy

A repülési feladat során hajtómű-pompázs lépett fel, a turbinalapátok leégtek, majd sikertelen légi indítást követően, 15 óra 35 perckor a pilóta katapultált. A repülőgép Kecskeméttől 5 km-re északra csapódott földbe.

Mivel a „KAP-3” biztosítókészülék zsinórját nem rögzítették az üléshez (4. ábra), így az ejtőernyő nem nyílt ki és Kóró István repülő őrnagy életét veszítette. [6].



4. ábra

Az SzK-1 típusú katapultülés nézeti képe (a „KAP-3”-zsinór rögzítési pontja piros színnel megjelölve)

4.2.2 Katapultálás MiG-21 PF típusú vadászipülőgépből (1968.08.17.)

Dusa János repülő főhadnagy (5. ábra) a MN 31. Honi Vadászipülő Ezred – Taszár – 2314-es fedélzeti számú MiG-21F-13 típusú vadászipülőgéppel, 1968. augusztus 17-én, ezredharcászati gyakorlaton vett részt.



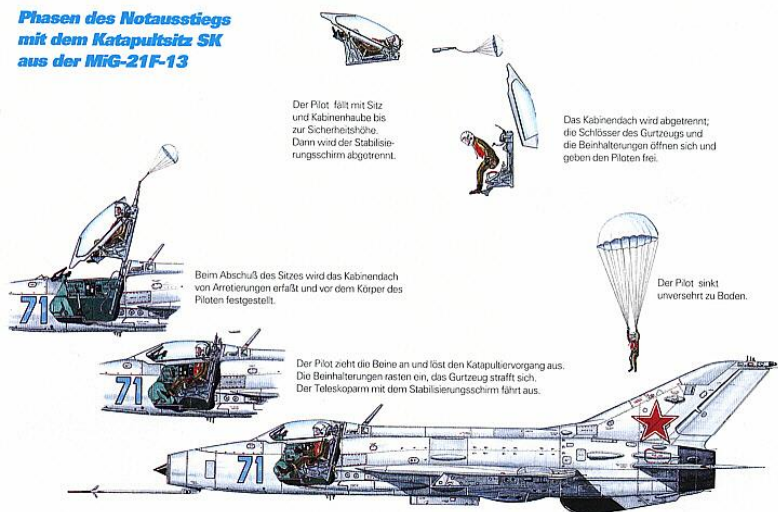
5. ábra

Dusa János repülő főhadnagy

Repülés során, 1200 m-es magasságon, 900 km/h sebességnél leállt a hajtómű. A pilóta – repülési magasság nyeresének céljából – ún. “ugrás” manőverbe vitte a gépet, majd sikertelen légiindítás után, 7 óra 38 perckor – parancsra – 600 m-es magasságon katapultált. A repülőgép lakatlan területen, Sárpilis mellett zuhant le.

A pilóta SzK-1 katapultüléssel – a kabintetővel együtt – hagyta el a repülőgépet (6. ábra), melynek során félcipői „elmaradtak” a lábairól.

**Phasen des Notausstiegs
mit dem Katapultsitz SK
aus der MiG-21F-13**



6. ábra

A katapultálás folyamata SzK-1 típusú katapultüléssel, MiG-21F-13 típusú vadászipülőgépből

A pilóta a pilóta mentőernyővel egy leartott, majd leégetett tarlón ért földet, amelyet alaposan „kidolgozott”: a hiányzó cipői miatt a földet érés erejét oldalra gurulással tompította. [7]

4.2.3 Katapultálás JAS-39 típusú vadászipülőgépből (2015.06.10.)

Kádár Sándor repülő őrnagy (7. ábra) a MH 59. Szentgyörgyi Dezső Repülőbázis – Kecskemét – 30-as fedélzeti számú JAS-39 típusú vadászipülőgéppel, 2015. június 10-én, jártasságfenntartás céljából, repülési feladatot hajtott végre.



7. ábra

Kádár Sándor őrnagy a katapultálását követően, a kórházi ágyon

Közvetlenül a felszállást követően a repülőgép fedélzetén erős ütést lehetett érezni, majd az – futómű-meghibásodás miatt – lassulni kezdett. A pilóta – a helyzetet értékelve – a katapultálás helyett a hasraszállás mellett döntött, amelyet – az üzemanyag kifogyasztását követően – 10 óra 52 perckor, a repülőtér munkaterületén sikeresen végrehajtott, majd – a kb. 120 csomós (220 km/h) sebességgel földön csúszó repülőgépből [8] – katapultálást hajtott végre (8. és 9. ábra).



8. és 9. ábra

A katapultálás folyamata MK10 típusú katapultüléssel, földön álló repülőgépből, valamint az eset helyszínén készült felvétel a repülőgéppel és a pilóta személyi mentőfelszerelésének elemeivel

Az MK10 katapultülés a vész-gépelhagyási folyamat során csak részlegesen vált le a pilótáról, aki – ennek következtében – a pilóta mentőejtőernyővel történő földet érésnél olyan súlyos gerincsérülést szenvedett, hogy – egészségügyi szempontból – a katonai repülésre alkalmatlanná vált, miközben hősiess tetteivel, nagyrértékű repülőtechnikát mentett meg a pusztulástól.

4.3 A három, ún. “második vészhelyzet” következményei...

A három eset részleteiben különbözik ugyan egymástól, de kialakulásukban a jelen tudományos probléma – az ún. “második vészhelyzet” – megjelenése viszont egyértelműen közös: ez a katapultülés és a pilóta mentőejtőernyő (a személyi vészmentő berendezés-komplexum), és/vagy a repülő-hajózó ruházat (a személyes védőfelszerelés) nem számított –, pontosabban nem annak gyártója által garantált, valamint alkalmazója által várt – módon történő működésében nyilvánult meg.

A három esetből az egyik halállal, a másik súlyos egészségkárosodással záródott, és csak a harmadik, vagyis egyetlen egy esetben(!) tudta az adott pilóta választott hivatását: katonai repülő-hajózó pályafutását a Haza szolgálatában – még hosszú ideig – folytatni. Ezek a rideg, tényszerű megállapítások!

De úgy is fogalmazhatok: a magyar katonai repülés a három eset során két fő, magasan képzett repülő-hajózót veszített el...

4.4 ... és tanulságai

A katonai repülésben bekövetkezett hasonló eseteket napjainkban Hazánkban –, a kiadott, hatályos “szabályszerkesztő eszközök”¹⁹ vonatkozó előírásai alapján mindig egy közigazgatási, valamint egy szakmai – vizsgálat kell, hogy kövesse. Az ezek lefolytatását követő hivatalos megállapítások kell, hogy gondoskodjanak arról, hogy az elvesztett repülőbajtársak áldozata ne legyen hiábavaló...

A két vizsgálati eljárás eredményeképpen leírt tényyszerű megállapítások kell, hogy az alapját képezzék azon precíz közigazgatási, illetve szakmai döntések meghozatalának, amelyek által új szabályzatok, eljárásrendek stb. kidolgozása és alkalmazása valósulhat meg, valamint a bizonyítottan (részlegesen vagy teljesen) alkalmatlan (régi) személyi (védő)felszerelés(ek) cseréje²⁰ és ezzel együtt a repülő-hajózó állomány új eszköz(ök) készségi szintű használatára történő felkészítése kerülhet végrehajtásra..., alapvetően a hasonló esetek megelőzése, vagyis a további személyi- és anyagi-technikai veszteség elkerülése céljából!

4.4.1 ...a hivatalos vizsgálatok megállapításai alapján levonva

Maradva a továbbiakban is a harmadik esetpéldánál, fontosnak tartom az alábbi, tényyszerűnek vett hivatalos, de a közvélemény számára is elérhetővé tett, nyílt forrásból származó megállapításokat leírni –, a publikáció tárgyát jelentő tudományos problémára, vagyis – az ún. “második vészhelyzet”-re vonatkozóan:

1. Az ún. „második vészhelyzet” a katapultüléstől való sikertelen leválás során következett be, amelyet a vágókés elégtelen működése okozott: a jobb oldali elvágó mechanizmusa nem vágta el teljes keresztmetszetében a pilóta jobb karja és az ülés közötti elfogó hevedert, így a rendellenes működés következtében az ülés nem vált le a pilótáról. (Hasonló probléma már korábban is előfordult ilyen típusú ülésnél, annak okait a gyártó vizsgálta.)

2. A hatósági vizsgálat – a személyi felelősség és a szabályok betartásának irányába indulva – már 2015-ben lezárult, megállapítva: a 30-as fedélzeti számú Gripennek egyértelműen olyan műszaki meghibásodás történt, amelyért a Magyar

¹⁹ Ez alatt pl. a 35/2008. (XII. 5.) KHEM–HM–IRM együttes rendeletet kell érteni, amely kizárólag az állami légijárművel bekövetkezett légiközlekedési balesetek, repülőesemények és légiközlekedési rendellenességek szakmai vizsgálatának részletes szabályait is tartalmazó jogszabályt jelent.

²⁰ Jelen publikációmban a második példa, majd egy ahhoz hasonló repülőesemény bekövetkezése vezetett a MN repülő-hajózó állománya addigi könnyű és kényelmes félcipőinek speciális repülő bakancsra történő lecseréléséhez, amely döntés dr. Szabó József repülő ezredes, a MN akkori repülőfőnöke nevéhez fűződik.
(Megjegyzés: a döntés csak részlegesen lehetett “népszerű” a korabeli repülő-hajózó állomány körében, vélelmezhetően ez vezetett az általánosságban nagy tiszteletnek örvendő repülő ezredes új beceneve – “Csizmás (Szabó)” – megjelenéséhez.)

Honvédség repülő-hajózó és repülő műszaki személyi állományából senkit nem terhel felelősség. [9].

3. A Magyar Honvédség részéről a szakmai vizsgálat legalább három évig (!) biztosan nem –, de egyes vélemények szerint mind a mai napig (!) sem – fejeződött be, feltehetőleg az azóta többször előfordult hasonló meghibásodások miatt.

4. A rendellenes ülésműködéssel kapcsolatban a Magyar Honvédség részéről szintén nem történt személyi felelősségre vonás [10].

4.4.2 ...saját volt hivatásom és gyakorlati tapasztalataim alapján levonva

Az adott esetpéldákból a hivatalos vizsgálatok megállapításai alapján levont tanulságok mellett – személy szerint – kiemelt jelentőséget tulajdonítok annak, hogy annak résztvevője –, az “Ember” – hogyan is “élte meg” az adott, ún. “második vészhelyzet”-et, a bekövetkezett, teljes (többszörös) repülési vészhelyzeti folyamat során!

Ennek alátámasztásaképpen szó szerint idézem az általam harmadik példának kiválasztott –, egyben a legjobban dokumentált – eset főszereplőjét, Kádár Sándor repülő őrnagyot:

*„...vészhelyzetben fontos, hogy azt az ember a begyakorolt mozdulatokkal oldja meg, és ne improvizáljon. Főleg az időkritikus dolgoknál fontos. Az enyém szerencsémre nem volt az. Vészhelyzetben nagyon fontos, hogy mennyi időd van rá, és hogy jól értelmezd a meghibásodást. Ha kevés idő van rá és nem jól értelmezed, az nagyon könnyen katasztrófához vezethet. Ha sok idő van rá és rosszul értelmezed, talán lesz időd korrigálni; ha sok idő van és jól is értelmezed, akkor jó eséllyel megoldod. Nálam ez utóbbi volt, mondhatni egy egyszerű meghibásodás, ami rosszul sült el, mert **a katapultülés meghibásodásával nem számolhattam**. A biztonságérzet, a „velem nem történhet meg” érzése bennem és a feleségemben is megtört. Óvatosabb lettem, úgy érzem jól magam. A kivizsgáláskor kérdezte a bizottság, hogy mi az, amit másképp csinálnék, de igazából semmit, mert a legjobb tudásom szerint döntöttem.” [11].*

Ha alaposan megfigyeljük a visszaemlékezést, pontosan megfogalmazódott benne a személyi mentőeszközbe vetett bizalom (!) teljes elvesztésének érzése! Ez egy adott repülésre veszélyes helyzetbe került, majd annak “nem előírászerű” kimenetelét “megélt” pilóta saját gyakorlati tapasztalatai alapján levont következtetését jelenti, amelyet – rendszerszinten is (!) – kiemelt fontossággal kell(ene) kezelni! De már nem az esetben érintett pilóta vonatkozásában...

Ez a negatív tapasztalat ugyanis egy, a jövőben bekövetkező hasonló esetben az éppen “aktuális” repülő-hajózó kolléga vész-gépelhagyásról szóló döntése meghozatalának időpontját tol(hat)ja ki, [12] vagy teheti lehetetlenné, amely esetlegesen halálos kimenetellel (is) járhat!

4.5 A modernkori magyar katonai repülés repülésbiztonsági statisztikája

Volt szakterületem betöltésekor végzett tudományos tevékenységem során – az általam előtalált, ténszerűnek vett esetek leírásai alapján – a magyar katonai repülés ejtőernyős vész-gépelhagyásainak eredményességét az 1945. évtől egészen napjainkig, az alábbi táblázatban összegezhettem (1. táblázat):

1. táblázat

Az 1945-től napjainkig végrehajtott ejtőernyős vész-gépelhagyások eredményessége.

Megnevezés			Személyek száma	
			[fő]	[%]
Ejtőernyős vész-gépelhagyást végrehajtott, összesen			88	100%
Eredményesség	túlélte	sérülés nélkül	56	63,65%
		könnyebb/súlyosabb sérüléssel	14	15,9%
	életét veszítette		18	20,45%

Az ejtőernyős vész-gépelhagyás során elhunyt repülő-hajózó bajtársak száma meglehetősen magas: gyakorlatilag minden ötödik életét veszítette!

5 Hogyan tovább?

A tárgykörben még további általános és részletes vizsgálatokat kell lefolytatni.

5.1 Célkitűzések az általános vizsgálatra vonatkozóan

Vizsgálat tárgyát kell, hogy képezze valamennyi ejtőernyős vész-gépelhagyás körülményeinek, az azokhoz vezető folyamatok és maga a végrehajtás pontos részleteinek megállapítása abból a célból, hogy a tudományos probléma tárgyát jelentő ún. "második vészhelyzet"-tel való kapcsolat megállapítható legyen.

5.2 Célkitűzések a részletes vizsgálatra vonatkozóan

Vizsgálat tárgyát kell, hogy képezze:

- a repülő-hajózó állomány személyi ejtőernyős vész-mentőrendszerbe vetett általános bizalmának megállapítása - (van/nincs/közömbös),
- a repülő-hajózó állomány személyi ejtőernyős vész-mentőrendszerbe vetett általános bizalmának erősítését szolgáló, pszichológiai alapú módszertani elemek megtalálása és beépítése az állomány ejtőernyős

vész-gépelhagyásra történő általános és speciális felkészítési programjába (tematikájába),

- a repülő-hajózó állomány általános ejtőernyős kiképzési (gyakorló) ugrásai során szerzett pozitív megerősítés tudatos felhasználhatóságának kérdése az ún. “szabálykövető magatartás”, mint személyiség-jellemző kialakítása céljából [13] - (szükséges/nem szükséges),
- az adott példaesetekben ejtőernyős vész-gépelhagyást végrehajtó személyeknél a kiképzési (gyakorló) ejtőernyős ugrásokhoz való általános hozzáállás meglétének megállapítása - (van/nincs/közömbös),
- az adott példaesetekben ejtőernyős vész-gépelhagyást végrehajtó személyeknél az – adott tevékenység előírászerű végrehajtását (is) megalapozó, illetve befolyásoló – ún. “szabálykövető magatartás”, mint személyiség-jellemző meglétének megállapítása - (volt/nem volt),
- az adott példaesetekben ejtőernyős vész-gépelhagyást végrehajtó személyeknél a folyamat során jelentkező ún. “időtorzulás”-jelenség meglétének megállapítása (volt/nem volt).

Összefoglalás

Publikációmban az ún. “második vészhelyzet”-et vizsgáltam meg, meglehetősen speciális nézőpontból. Rövid összefoglalómat szemléletesebbé tudtam tenni három példával: a magyar katonai repülésben bekövetkezett ejtőernyős vész-gépelhagyások rövid, de tényszerű leírásával.

Publikációm összeállításakor nemcsak a dokumentált (szak)irodalmi forrásokat, hanem saját gyakorlati tapasztalataimat is felhasználtam, amelyekkel 23 éves hivatásos katonai pályám során először mint repülő műszaki, később mint repülő-hajózó, végül mint ejtőernyős tiszt, majd főtiszt gazdagodhattam.

Köszönetnyilvánítás

Ezen publikáció elkészítésével kapcsolatosan köszönetemet fejezem ki:

volt konzulensemnek, barátomnak, néhai Kastély Sándor okl. gépészmérnöknek, ejtőernyős oktatónak, ejtőernyő-beugrónak, hogy a vele folytatott szakmai beszélgetések során felhívta a figyelmemet az adott tudományos problémára,

repülőbajtársamnak, Dr. Katona István ny. őrnagy vadászpilótának, hogy megosztotta velem az ún. “időtorzulás”-sal kapcsolatos, saját ejtőernyős vész-gépelhagyása során szerzett gyakorlati tapasztalatait,

repüléstörténeti gyűjtő barátomnak, Győri János ny. alezredesnek, hogy lehetővé tette részemre a magyar katonai repüléssel kapcsolatosan készített, egyedülálló publikációi alapját képező, általa összegyűjtött, kizárólag igazolt, tényszerűnek vett forrásanyagainak felhasználásához való hozzáférést.

Források

- [1] Dr. Kiss Sándor mk. alezredes: Biztonságtechnika alapjai. Főiskolai jegyzet, Zrínyi Miklós Nemzetvédelmi Egyetem Bolyai János Katonai Műszaki Főiskolai Kar, Budapest. 2004. 12. o.
- [2] Szabó József (főszerkesztő) és munkatársai: Repülési lexikon. Második kötet M-Z, Akadémiai Kiadó, Budapest, 1991, 200. o.
- [3] Авторский коллектив под общ. Ред. Феоктистова, К. П.: Космические аппараты. Военное Издательство, Москва, 1983. 277. o.
- [4] Kastély Sándor: “Épeszü ember ép gépből nem ugrik ki...”, Repülés-Ejtőernyőzés, 1984/5, 9. o.
- [5] Kastély Sándor: A mentőejtőernyő rendszerek szerkezete, kezelés, használata, vizsgálata. Ejtőernyős tájékoztató, LRI Repüléstudományi és Tájékoztatói Központ kiadványa, Budapest, 1993/1-2, 5. o.
- [6] Győri János: Akiket nem kísért a szerencse... Magyar Repüléstörténeti Társaság, Budapest 2013, 43. o.
- [7] Kositzky Attila: Vadászpilóták és bajtársak. Száz év a haza szolgálatában. Balatonfüred Városért Közalapítvány, Balatonfüred, 2016. 150-152. o.
- [8] Szórad Tamás: A másik ötven százalék. (Letöltve: 2018.06.15-én az Air Base blog (t.szorad@gmail.com)-ról, a cikk nyomtatott változata az Aeromagazin 2017. december - 2018. január számában jelent meg.)
- [9] Szórad Tamás: A másik ötven százalék. (Letöltve: 2018.06.15-én az Air Base blog (t.szorad@gmail.com)-ról, a cikk nyomtatott változata az Aeromagazin 2017. december - 2018. január számában jelent meg.)
- [10] Szórad Tamás: A másik ötven százalék. (Letöltve: 2018.06.15-én az Air Base blog (t.szorad@gmail.com)-ról, a cikk nyomtatott változata az Aeromagazin 2017. december - 2018. január számában jelent meg.)
- [11] Szórad Tamás: A másik ötven százalék. (Letöltve: 2018.06.15-én az Air Base blog (t.szorad@gmail.com)-ról, a cikk nyomtatott változata az Aeromagazin 2017. december - 2018. január számában jelent meg.)
- [12] Szaniszló Zsolt: Az orosz katapultülések kifejlesztési folyamatának biztonságtechnikai szempontok szerinti vizsgálata I., Hadmérnök, VIII. Évfolyam 3. szám - 2013. szeptember, 17. o.
- [13] Freytag Béla alezredes: A hajózó hallgatók ejtőernyős kiképzése, Repüléstudományi Közlemények, 1991/1, 57-63. o.

Absztraktok

A Kiadvány ezen részében azok az előadás kivonatok gyűjteménye található meg, mely előadásokhoz a szerzők tudományos cikket nem kívántak benyújtani.

UWB kommunikáció kihívásai

Wührl Tibor

Óbudai Egyetem Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar

wuhrl.tibor@kvk.uni-obuda.hu

ORCID: 0000-0002-7522-3511

Gyányi Sándor

Óbudai Egyetem Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar

gyanyi.sandor@kvk.uni-obuda.hu

ORCID: 0000-0002-7522-3511

Absztrakt: Az UWB Ultra Wide Band kommunikáció egy viszonylag új adatátviteli szemléletet jelentő kommunikációs technika, aminek gyökerei a távoli történelmi múltba mutatnak és most napjainkban robbanásszerűen terjed. Ezen kommunikációs módszer alkalmazása és a rádiós csatorna felhasználása új kihívásokat rejt. Mindez új frekvencia spektrum használhatóság és zavarítás megközelítést eredményez. A széles frekvenciasávban történő adatátvitel, de rendkívül alacsony kisugárzott teljesítmény a tradicionális kommunikációs eljárások számára zaj határ alattinak tekintett. Az UWB kommunikációs módszerek fizikai rétegét IEEE802 és ITU-R [1] szabványok rögzítik, melyben előírtak betartása garantálja a más kommunikációs megoldások kis mértékű, gyakorlatban elhanyagolható zavarítását. Min e mellett az UWB kommunikációra is érvényes a Sahnnon-Hartley csatorna kapacitás modell, mely modellből ha kiindulunk, megállapíthatjuk, hogy a sikeres adatátvitelhez, vagy távolság meghatározáshoz bizonyos feltételeknek teljesülniük kell. Az interoperabilitási ökoszisztéma és így a különféle rádiós kommunikációs megoldások békés egymás mellett működésének kidolgozásán a FiRa konzorcium dolgozik [2].

Kulcsszavak: UWB, zaj határ, zaj, jel-zaj viszony

Hivatkozott irodalom

[1] ITU-R ajánlás: RECOMMENDATION ITU-R SM.1755-0 Characteristics of ultra-wideband technology (2020-04-20, E70000 kiadás); https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/sm/R-REC-SM.1755-0-200605-1!!PDF-E.pdf (elérhetőség 2025.10.10)

[2] Mészáros Csaba: Amit az Ultra Widebandről tudni kell; ComputerTrends <https://www.computertrends.hu/tech/amit-az-ultra-widebandrol-tudni-kell-273775.html> (elérhetőség 2025.10.10)

3D-s röntgenmikroszkópia alkalmazási lehetőségei az autóelektronikai termékek fizikai analízise során

Petrik Attila

Attila.Petrik@hu.bosch.com

Robert Bosch Kft. | Postafiók 331 | H-1475 Budapest | HUNGARY |

www.bosch.hu

Absztrakt: Az autóelektronikai vezérlőegységek megbízhatósági vizsgálatai során az érdeklődés középpontjában a különböző kötéstechológiákkal készült elektromos kötések integritása áll, ugyanis a tönkremenetelek döntő többsége a kötésekkel áll szoros kapcsolatban. A 3D-s röntgenmikroszkópia - ami röntgenes képalkotási eljárást jelent - új lehetőségeket nyit ezen a téren, ugyanis az eddigi roncsolásos vizsgálatok helyett, mint pl. csiszolatkészítés, sokkal megbízhatóbb, mikrométeres felbontású 3D-s információt biztosít a kötések állapotáról. A képalkotás a különböző élettartam tesztek, öregítések között is elvégezhető ugyanazon a mintadarabon és az egyes terhelések hatása külön-külön is tanulmányozható, nyomon követhető, és az eredmények jól hasznosíthatók szimulációs modellekben is. A kötések vizsgálatán túlmenően szenzorok, mikro-elektromechanikus rendszerek(MEMS) vizsgálatának is egy ígéretes módszere, esetükben szubmikronos felbontás is elérhető.

Product development, reliability and validation at Bosch Budapest Development Center

Tóth-Ilkó Ákos

Akos.Toth-Ilko@hu.[bosch](https://www.bosch.com).com

Robert Bosch Kft. | Postafiók 331 | H-1475 Budapest | HUNGARY |
www.bosch.hu

Abstract: In my presentation, I will highlight how the Bosch Budapest Development Center seamlessly integrates the reliability philosophy into every stage of automotive electronics product development. Our comprehensive validation strategy encompasses reliability aspects, diverse environmental testing, and thorough physico-chemical investigations to guarantee product integrity and adequate lifetime. This extensive environmental validation ensures our solutions perform consistently and reliably in real-world conditions.

Ericsson: kutatás-fejlesztés, innováció és trendek a telekommunikációban

Morvay Dániel

daniel.ferenc.morvay@ericsson.com

ERICSSON,

termékfejlesztési vezető

Absztrakt: Az Ericsson több évtizedes története során a távközlés egyik vezető innovátorává vált, folyamatosan alkalmazkodva és alakítva az iparág változásait. Jelenleg a vállalat a telekommunikáció és az IT szoros integrációjára fókuszál, különös hangsúlyt fektetve a cloud technológiákra, automatizációra, mesterséges intelligenciára és biztonságra. Az Ericsson magyarországi kutatás-fejlesztési központja kulcsszerepet tölt be a globális innovációs láncban, ahol villamosmérnöki és IT szakértelem egyaránt jelen van, támogatva a folyamatos fejlődést. Az iparág fő trendjei közé tartozik az 5G elterjedése, hálózati virtualizáció, energiahatékonyság és az intelligens hálózatok fejlesztése, amelyek mind beépülnek a helyi fejlesztési projektekbe. Az előadás bemutatja, hogy mivel foglalkozik az Ericsson, azon belül is az itthoni kutatás-fejlesztési központ és mik az iparág fő trendjei és kihívásai.

Autonóm távközlési hálózatok üzemeltetése MI és tudásbázis segítségével

Dr. Antal Csaba PhD

csaba.antal@ericsson.com

ERICSSON

Technológiai igazgató

Adat és Mesterséges Intelligencia

Az előadás bemutatja, hogyan lehet a mesterséges intelligencia és a strukturált tudásbázisok kombinációjával autonóm módon üzemeltetni távközlési hálózatokat — különös tekintettel az automatizált hibakezelésre, optimalizálásra és teljesítménymenedzsmentre. Ismertetem a zárt hurkú (closed-loop) vezérlések, az intent-alapú hálózatmenedzsment és az MI-alapú döntéstámogatás fő elemeit. Részletesen bemutatom az Ericsson BSS/OSS portfóliójának fő komponenseit, valamint a legújabb MI-fejlesztési irányokat, amelyek magukban foglalják a nagy nyelvi modellek, MI-ügynökök és tudásbázisok alkalmazását. Kitérek arra is, hogy a tudásbázisok miként képesek kódolni a tapasztalatokat, működési folyamatokat és megfelelési szabályokat, ezáltal javítva az automatizáció magyarázhatóságát, megbízhatóságát és hibadiagnosztikáját. Az előadás végén összefoglalom az ilyen rendszerek várható előnyeit és a megvalósításuk során felmerülő fő kihívásokat.

Kandós mérnökök a munkaerőpiacon: kihívások és lehetőségek

Tari Dóra

Schneider Electric

dora.tari@se.com

<https://www.se.com/hu/hu/>

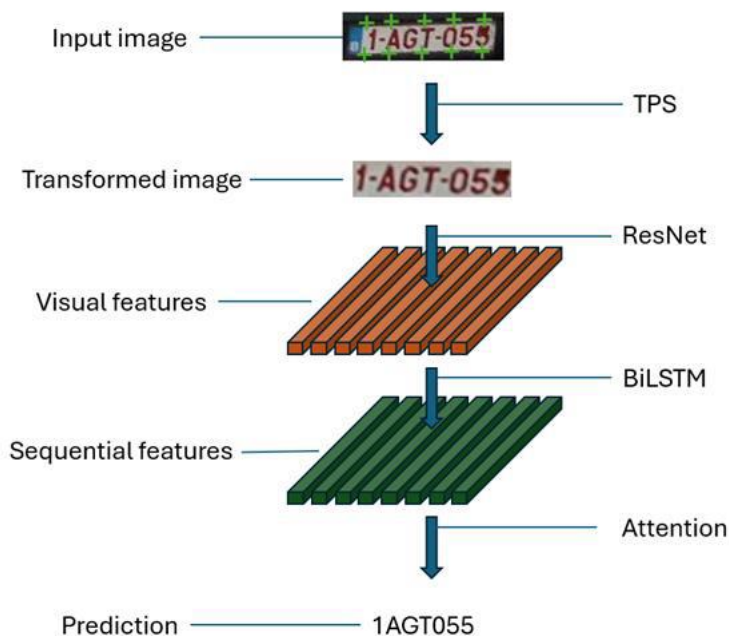
Absztrakt: Az előadás célja, hogy valós példákon keresztül bemutassa, hogyan boldogulnak a Kandó Kálmán Villamosmérnöki Karon végzett mérnökök a munkaerőpiacon. A prezentáló kolléga saját karrierútján keresztül ismerteti az egyetemről való kilépés utáni első lépéseket, a kezdeti nehézségeket, valamint azokat a szakmai mérföldköveket, amelyek a fejlődését meghatározták. Az előadás kitér arra is, milyen kompetenciákat tartanak erősségnek a munkáltatók a Kandós végzettséggel rendelkező pályakezdők esetében, és mely területeken van szükség további fejlesztésre – különösen a soft skills, idegen nyelvi kompetenciák és a technológiai trendek követése terén. További példákon keresztül bemutatásra kerül, hogy a Kandós diploma milyen pályautakat nyithat meg – legyen szó ipari, kutatási vagy nemzetközi karierről. Az előadás zárásaként a jövő mérnökeinek szóló tanácsok és motivációs gondolatok hangzanak el, kiemelve az egyetemi évek tudatos kihasználásának fontosságát.

Country-Specific Format Challenges of License Plate Recognition

Gergő Bendegúz Békési

*Budapest University of Technology and Economics, Department of
Automation and Applied Informatics, 3. Műegyetem rakpart,
Budapest, 1111, HU*

Abstract: Automatic license plate recognition (LPR) systems must cope with highly diverse plate formats and environmental distortions. This study evaluates the impact of both country-specific design variations and weather conditions on recognition performance. Extending earlier efforts focused mainly on Polish and Central European contexts, the dataset was broadened to encompass 45,640 license plate images from 64 countries, compiled from PlatesMania.com and manually curated with text-level labels. A CNN–BiLSTM–attention pipeline, enhanced with a TPS transformation module, was trained and tested under three scenarios: local-only training, cross-country transfer, and fine-tuning. The results highlight that modest local fine-tuning after global pretraining yields the most robust performance, while peripheral plate elements such as slogans and symbols remain a key source of errors. Weather simulations (rain, fog, snow, sun glare, and shadow) reveal predictable degradation patterns, with snow and glare having the strongest adverse effects. The findings underscore the necessity of both cross-country generalization and adaptation to adverse environmental conditions for reliable large-scale deployment of LPR systems.



Block diagram of the proposed architecture

References

- [1] G. B. Békési and Péter Ekler, "A CNN-RNN hybrid approach for Polish license plate recognition: Harnessing transfer learning and real-world validation," *Machine Graphics and Vision*, vol. 34, no. 2, pp. 39–67, Jun. 2025, doi: <https://doi.org/10.22630/mgv.2024.34.2.3>
- [2] Muhammad Murtaza Khan, M. Ilyas, Ishtiaq Rasool Khan, Saleh Alshomrani, and Susanto Rahardja, "License Plate Recognition Methods Employing Neural Networks," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 73613–73646, Jan. 2023, doi: <https://doi.org/10.1109/access.2023.3254365>

Virtuális valóság a katasztrófavédelemben - Szimulációs gyakorló és oktató program

Imre László

imrel@fercom.hu

Fercom Systems Kft

Absztrakt: Cégünk a Fercom Systems Kft. több évtizede dolgozik kormányzati és ipari partnerekkel, akik nap mint nap katasztrófhelyzetekben állnak helyt. A gyors és hatékony feladat elvégzéshez elengedhetetlen a Motorola professzionális rádió kommunikációja, a szélsőséges körülményekre tervezett eszközök és természetesen az alapos felkészülés. Az XVR Simulation egy innovatív, virtuális valóság alapú képzési és szimulációs rendszer, amely lehetővé teszi, hogy a résztvevők valósághű környezetben gyakorolják a döntéshozatali és a problémamegoldást különféle krízishelyzetekben. A platform erőssége, hogy interaktív, háromdimenziós szimulációkat kínál, amelyekben a hallgatók biztonságos keretek között próbálhatják ki tudásukat, miközben nincsenek kitéve valódi veszélynek. Az XVR Simulation számos területen alkalmazható: katasztrófavédelem, tűzoltás, közlekedésbiztonság, ipari balesetek és egészségügyi vészhelyzetek kezelésének oktatásában egyaránt. A rendszer rugalmasan alakítható, így az egyszerűbb szituációktól egészen a nagy léptékű, összetett eseményekig változatos forgatókönyvek állíthatók össze. Egyetemisták számára az XVR különösen hasznos, mivel összekapcsolja az elméleti tudás elsajátítását a valósághoz közeli gyakorlati tapasztalatokkal. A hallgatók megtanulják a helyzetek gyors elemzését, a döntések következményeinek értékelését, valamint a hatékony kommunikáció és csapatmunka fontosságát. Mindez hozzájárul ahhoz, hogy felkészültebbek legyenek a pályájuk során rájuk váró kihívások kezelésére. Az XVR Simulation költséghatékony megoldás is, hiszen lehetővé teszi a tapasztalat megszerzését drága és kockázatos valós körülmények megteremtése nélkül. A rendszer használata ezért nemcsak a tanulók egyéni fejlődését támogatja, hanem az oktatási intézmények számára is értékes eszközt jelent a modern, élmény alapú tanulás megvalósításában. Az egyetemisták részére mind az XVR alkalmazás, mind a megoldás testreszabhatósága és fejlesztése kiváló lehetőség.



A Vasúti jelzőrendszerek energiaellátásának kiberbiztonsági kockázatelemzése

Dér Attila^{1,2}, Ady László^{1,2}, Rajnai Zoltán¹, Schuster György³

1 Óbudai Egyetem Biztonságtudományi Doktori Iskola, Népszínház utca 8., 1081 Budapest, Magyarország

2 NextTechnologies Kft., Sugár út 44, 2234Maglód, Magyarország

3 Óbudai Egyetem Kandó Kálmán Kar, Tavaszmező utca 17., 1084 Budapest, Magyarország

Absztrakt: A vasút a modern társadalmak meghatározó kritikus infrastruktúrája, amely kulcsszerepet játszik az egyes országok térségek távolságainak áthidalásában. Az energiaellátás kibervédelmi kérdései a vasúti szállításban rendkívül kritikusak, hiszen a folyamatos energiaellátás elengedhetetlen a vasúti közlekedés működéséhez. A vasúti infrastruktúra energiaellátási rendszerei részben monitorozottak és automatizáltak, hogy biztosítsák a folyamatos és megbízható működést. Ezek a rendszerek valamilyen fajta automatizált számítógépes irányításon alapuló eszközökön keresztül valósulnak meg. Ezek a berendezések, eszközök kibertámadása, súlyosan befolyásolja a vasúti közlekedés alapvető infrastruktúráját. Ennek érdekében kiemelten fontos megérteni a kötött pályás közlekedés irányítási rendszereinek kockázatait, mint például a kiber-fizikai biztonsági réseket, a rosszindulatú behatolásokat és az adatmanipulációt. Az automatizálás és az információ szintjének növelése érdekében a vasúti jelzőrendszerekben nagy mennyiségű közös információs technológiát alkalmaznak, ami a jelzőrendszerek nyitottságának növekedésével és a biztonsági kockázatok növekedésével jár. A biztonsági kockázatok hatásainak számszerűsítése sürgős feladat, amely a vasúti jelzőrendszerek számára nagy kihívást jelent a következők miatt a biztonsági mérőszámok és a hatékony értékelési megközelítés hiánya miatt. A tanulmányban a vasúti jelzőrendszerek szolgáltatási jellemzői és kiberfizikai jellemzői alapján egy rugalmasság-alapú biztonsági értékelési megközelítést javaslok a teljesítményváltozás leírására a biztonsági események különböző szakaszaiban, amely szemléltetheti a kibertámadásokkal szembenező jelzőrendszerek robusztusságát és helyreállítási képességét.[1][2]

Referenciák

- [1] H. Wang, M. Ni, S. Gao, F. Bao, and H. Tang, 'A Resilience-Based Security Assessment Approach for Railway Signalling Systems', Wuhan: IEEE, Jul. 2018, pp. 7724–7729. doi: 10.23919/ChiCC.2018.8483166.

- [2] H. Altaleb, L. Ady, P. J. Varga, and Z. Rajnai, ‘ACSRA ICS: Automated Cyber Security Risk A Industrial Control Systems’, ACTA POLYTECH HUNG, vol. 22, no. 2, pp. 47–74, 2025, doi: 10.12700/APH.22.2.2025.2.4.

Information About Some Research Activities in Institute of Multimedia ICT, Slovak University of Technology

Peter Farkaš*,**

SM, LM IEEE

* Institute of Multimedia Information and Communication Technologies, Faculty of Electrical Eng. and Information Technology, Slovak University of Technology

** Institute of Applied Informatics, Faculty of Informatics, Pan European University Bratislava, Slovakia p.farkas@ieee.org

Abstract: In this contribution an overview about two actual running projects in Institute of Multimedia Information and Communication Technologies, Faculty of Electrical Engineering and Information Technology, Slovak University of Technology will be presented. These projects are follow ups of the COST Action I CA22168 “Physical layer security for trustworthy and resilient 6G system”. The first project is titled: “Securing Data in Post-Quantum Age: Advanced Coding Systems for Physical Layer Security, Distributed and DNA Storages”. The research work in this project is concentrated on three areas: Physical Layer Security for the post-quantum 6G era; Coding with locality, availability and scalability for data repair in distributed clouds; Coding for nanopore-based DNA storages. The project started in September 2024, therefore there are some publications, which will be mentioned shortly in the presentation and which are listed in References. Its end is planned for August 2026. It is funded by European Union NextGenerationEU through the Recovery and Resilience Plan for Slovakia under the No. 09105-03-V02-00051. The second project title is: “Complete Complementary Signals for Integrated Sensing and Communication Infrastructure”. Different systems such as radar and communications have different requirements on used waveforms. Therefore in this project two dimensional complete complementary waveforms and corresponding system components will be developed. This project started in September 2025 and its finish is planned for Year 2029. It is funded by The Slovak Research and Development Agency under contract no. APVV-24-0373 Keywords—data recovery, codes with locality availability and scalability, coding, nanopore-based DNA storage, light stream cypher system, physical layer security, complete complementary codes

REFERENCES

- [1] FARKAŠ, Peter et al.: “Model for InDels and Substitutions in Nanopore DNA Storage Based on Measured Data”, Proc. of International Conference on Electrical and Computer Engineering Researches (ICECER 2025), 6.–8.

December 2025, Antananarivo – Madagascar, IEEE Piscataway NJ, USA
(accepted for publication)

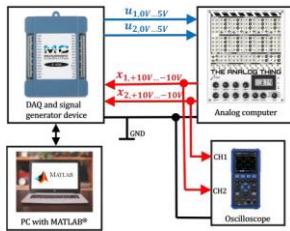
- [2] FARKAŠ, Peter - FARKAŠOVÁ, Katarína - PAVELKA, Frederik, Fractal codes with locality and availability. In Journal of Electrical Engineering. Vol. 76, no. 4 (2025), s. 356-360. ISSN 1335-3632 (2024: 1.2 - JIF, Q4 - JIF Best Q, 0.225 - SJR, Q3 - SJR Best Q, 0.176 - AIS, Q4 – AIS Best Q). SCOPUS: 2-s2.0-105012764879 ; DOI: 10.2478/jee-2025-0036 ; SCOPUS_INTID ; WOS: 001545453600008.
- [3] FARKAŠ, Peter et al.: “Model for InDels and Substitutions in Nanopore DNA Storage Based on Measured Data”, Proc. of International Conference on Electrical and Computer Engineering Researches (ICECER 2025), 6.–8. December 2025, Antananarivo – Madagascar, IEEE Piscataway NJ, USA
- [4] FARKAŠ, Peter et al., "nanoporDNAmemory_indels_model.m," GitHub repository, <https://github.com/talenik/digi>
- [5] FARKAŠ, Peter - FARKAŠOVÁ, Katarína - PAVELKA, Frederik - RAKÚS, Martin, “New family of linear 3-erasure correcting block codes with possible application in storage systems”. In Computing and Informatics. Vol. 44, no. 2 (2025), pp. 429-444. ISSN 1335-9150 (2024: 1.7 - JIF, Q3 - JIF Best Q, 0.33 - SJR, Q3 - SJR Best Q, 0.178 - AIS, Q4 - AIS Best Q). V database: DOI:10.31577/cai_2025_2_429 ; CC: 001521613200005 ; WOS: 001521613200005 ; SCOPUS: 2-s2.0-105008513817.
- [6] FARKAŠ, Peter - FARKAŠOVÁ, Katarína - PAVELKA, Frederik, Low Complexity Encoder Hardware for a Novel Family of Linear Block Codes. In: Proceedings Book of the 1st International Conference on Computer Science and Information Technology – CSIT® 2025. 1. Durrës, Albania: LUIS Print, 2025, pp. 365-380. ISBN 9789928835147.
- [7] FARKAŠ, Peter - FARKAŠOVÁ, Katarína - PAVELKA, Frederik, Low Complexity Decoder Hardware for a Novel Family of Linear Block Codes. In ICEST 2025: 60th International Scientific Conference on Information, Communication and Energy Systems and Technologies, Ohrid, North Macedonia. June 26-28, 2025. 1. ed. Piscataway, New Jersey, USA: IEEE, 2025, [4] s. ISSN 2603-3267. ISBN 979-8-3315-2655-9. In database: DOI: 10.1109/ICEST66328.2025.11098228.

Nemlineáris folyamatok szabályzása méréssel felvett, tenzorszorzat alapú közelítő rendszermodell segítségével.

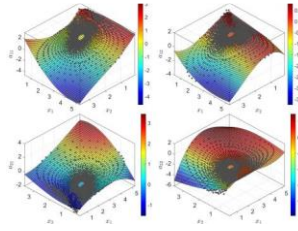
Varga Árpád

Alkalmazott Informatikai és Alkalmazott Matematikai Doktori Iskola, Óbudai Egyetem

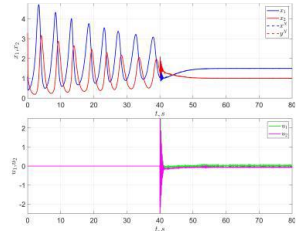
Absztrakt: Amennyiben a feladat egy szabályozó tervezése nemlineáris folyamathoz, az első lépés mindig a rendszer közelítő matematikai modelljének meghatározása vagy a rendelkezésre álló előzetes ismeretek, vagy mérési eredmények alapján. Jelen cikkben egy nemlineáris rendszerek közelítő modellezésére és szabályzására szolgáló javasolt módszertan kerül bemutatásra egy nemlineáris csillapított Lotka-Volterra populációdinamika esettanulmányán keresztül, amely egy ragadozó és préda faj egyedszámának idealizált időbeli lefolyását írja le [1]. Amennyiben az állapotvektor és annak deriváltja mérhető, az állapotmátrix közelítő értéke számítható a pszeudo-inverz művelet segítségével. Az állapotmátrix egyes elemei külön-külön is függhetnek az állapotvektor elemeitől, amely kapcsolat közelíthető illesztett polinomfüggvényekkel. Nagy méretű rendszermátrixok és magas fokú polinomok esetén a rendszer jellemzésére szolgáló paraméterek számának csökkentése érdekében érdemes lehet áttérni a tenzorszorzat alapú modellre. Ebben a formában az állapotváltozó-függő rendszermátrix számítható néhány konstans mátrix súlyfüggvényekkel adott lineáris kombinációjaként [2]. Ha a rendszer közelítő modellje már rendelkezésre áll, a szükséges szabályzó kimenetek meghatározhatóak a számított nyomaték szabályzás (Computed Torque Control: CTC) elvének megfelelően, annak érdekében, hogy a rendszer kimenetei kövessenek egy előre meghatározott nominális pályát. A javasolt szabályzási módszertan hatékonysága és hátrányai a szimulációs eredmények mellett mérési eredményeken keresztül is bemutatásra kerül, mivel a kiválasztott nemlineáris rendszer működése a fizikai valóságban is megvalósításra került egy analóg számítógép segítségével.



1. ábra – A mérési elrendezés vázlata az analóg számítógéppel és az adatgyűjtő eszközzel.



2. ábra – A méréssel felvett A rendszermátrix a_{11} , a_{12} , a_{21} , a_{22} elemei az állapotváltozók függvényében és a rájuk illesztett polinom-felülettel



3. ábra – A mérések alapján felvett modellen alapuló szabályzó működése

Irodalmi hivatkozások

[1] Wangersky, P. J. (1978). Lotka-Volterra population models. Annual Review of Ecology and Systematics, 9, 189-218.

[2] Baranyi, P. (2004). TP model transformation as a way to LMI-based controller design. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 51(2), 387-400.

3. ábra – A mérések alapján felvett modellen alapuló szabályzó működése

1. ábra – A mérési elrendezés vázlata az analóg számítógéppel és az adatgyűjtő eszközzel.

2. ábra – A méréssel felvett A rendszermátrix a_{11} , a_{12} , a_{21} , a_{22} elemei az állapotváltozók függvényében és a rájuk illesztett polinom-felülettel

A villamosmérnök hallgatók szakmai identitásának vizsgálata az Óbudai Egyetem Kandó Kálmán Villamosmérnöki Karán

Varga Zsolt

varga.zsolt@kvk.uni-obuda.hu

Óbudai Egyetem Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar, EKRI, Budapest

Absztrakt: Kutatásomban azt vizsgálom, hogy az Óbudai Egyetem Kandó Kálmán Villamosmérnöki Karán tanuló hallgatók mennyire tudatosan választották tanulmányaik helyszínét, illetve milyen fejlettségi szinten áll szakmai identitásuk. Az empirikus vizsgálat alapját a Nemzeti Szakképzési és Felnőttképzési Hivatal által kidolgozott kérdőív adaptált változata képezte, amelyet online formában töltöttek ki a hallgatók. A kérdések három fő területet érintettek: az önismeret és személyes erőforrások, a társas és intézményi környezet, valamint az identitásfejlődés szakaszai. A kutatás mintáját az elsőéves villamosmérnök, valamint a nappali és levelező tagozatos harmadéves infokommunikáció szakos hallgatók alkották, akik önkéntesen vettek részt a felmérésben. Az adatok feldolgozását és grafikus megjelenítését a Google űrlapok és táblázatkezelő eszközei segítségével végeztem. Az eredmények részben igazolták a feltételezéseimet, különösen a pályaválasztási motivációk tudatosságát illetően, ugyanakkor több váratlan összefüggés is kirajzolódott a szakmai önazonosság alakulásában. Az előadásban ezeknek a tapasztalatoknak az ismertetésére és a hallgatói identitásfejlődés pedagógiai implikációinak bemutatására vállalkozom.

A state of the art power modulok elektromos komponensei

Balogh Tamás

Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Közhasznú Nonprofit Kft.

A megújuló energiaforrások és az elektromos autózás szélesebb körű elterjedésének egyik feltétele a megbízható és nagy hatásfokkal üzemelő energiaátalakítók megléte. A SiC és GaN teljesítmény félvezetők lehetővé teszik a nagy hatásfokú működést, elősegítve a méretek és a súly csökkenését. Az előadásom során ezen félvezetők működését, felépítését szeretném bemutatni. Azonban, a state of the art félvezetőkön kívül szükség van más áramköri építőelemekre, mint pl. a termisztorok, áramérzékelő elemek, kapacitások. Ezen alkatrészekkel szemben támasztott követelmények nem másodlagosak. Gyakorlati példákön szemléltetem a passzív áramköri elemek kiválasztási kritériumait és azon tulajdonságokat, amik lehetővé teszik alkalmazásukat.

Referenciák:

www.endrich.com

www.susumu.co.jp/english/

<https://sensor-tateyama.com>

www.infineon.com

www.isabellenhuette.com

www.tdk-electronics.tdk.com

Gépbiztonság jövője, az ipari automatizálás és kiberbiztonság kapcsolata

R.N. Dénes F., K. Tibor

email: rez-nagy.denes@infocontrol.eu

Web: www.infocontrol.hu

Infocontrol Hungária Kft. 2040 Budaörs, Fagyöngy utca 4.

Absztrakt: Az ipari automatizálás egy rendkívül fontos összetevője a gépbiztonság, melyet jelenleg a 2006/42/EK irányelv, ismertebb nevén a "gépdirektíva", ami hazánkban a 16/2008 NFGM rendelet formájában lett honosítva. 2027 januárjától azonban ez meg fog változni, ettől fogva az új EU 2023/1230[1] rendelet veszi át helyét. Ebben a cikkben a főbb különbségeket fogjuk összefoglalni a gépdirektíva és géprendelet között, valamint ezen különbségek várható hatásait az ipari automatizálás terén. Az új géprendelet támaszt kiberbiztonsági elvárásokat is a gépgyártók felé.[1] Mely elvárások a NIS2(EU 2022/2555)[2] irányelvvel és CRA(EU 2024/2847)[3] rendelettel egyetemben megkerülhetet lenné teszik, a kiberbiztonság témakörét, az ipari automatizálásban dolgozók és azon belül akár a programozható vezérlések tervezői és a PLC programozók számára is.[1,2,3] Összefoglaljuk a NIS2 és CRA a gépépítők és üzemeltetők szemszögéből legfontosabb aspektusait, kihívásait és a szabvány harmonizálás állapotát.

Hivatkozások:

- [1] Az Európai Parlament és a Tanács, Az Európai Parlament és a Tanács (EU) 2023/1230 rendelete (2023. június 14.) a gépekről és a 2006/42/EK európai parlamenti és tanácsi irányelv és a 73/361/EGK tanácsi irányelv hatályon kívül helyezéséről, Az Európai Unió Hivatalos Lapja, vol. L 165, pp. 1–102, 2023. jún. 29.
- [2] Az Európai Parlament és a Tanács, Az Európai Parlament és a Tanács (EU) 2022/2555 irányelve (2022. december 14.) az Unió egész területén egységesen magas szintű kiberbiztonságot biztosító intézkedésekről, valamint a 910/2014/EU rendelet és az (EU) 2018/1972 irányelv módosításáról, továbbá az (EU) 2016/1148 irányelv hatályon kívül helyezéséről (NIS 2 irányelv), Az Európai Unió Hivatalos Lapja, vol. L 333, pp. 80–152, 2022. dec. 27. [3] Az Európai Parlament és a Tanács, Az Európai Parlament és a Tanács (EU) 2024/2109 rendelete (2024. augusztus 13.) a digitális elemekkel rendelkező termékekre vonatkozó horizontális kiberbiztonsági követelményekről és a 168/2013/EU rendelet és az (EU) 2020/1057 irányelv módosításáról (kiberreziliencia-törvény), Az Európai Unió Hivatalos Lapja, vol. L, 2024/2109, pp. 1-89, 2024. aug. 13.

Measurement applications in the validation of CLAAS products

L. Gurmai

CLAAS Hungaria Kft. 5200 Törökszentmiklós, Kombájn utca 1. Hungary

Abstract: Modern agricultural machinery manufacturers, including CLAAS, use a number of innovative measurement systems in the product development process. Product validation is an essential step in the development phase. The aim is to make sure that the machines developed meet the predefined requirements. In order to do this, various tests and measurements must be carried out. The durability, performance and functional compliance of the machines and their ability to meet the specifications must be measured. During validation, several physical parameters are measured, such as the stresses in the structure, the oil pressures generated in the gearboxes or the power requirements of the structure. A few practical examples will be given to illustrate the technical solutions that allow the necessary precision measurements to be made, even under difficult agricultural conditions.

Hidrogén szerepe az energiabiztonság növelésében a megújuló energiaforrások integrációja mellett

Sárdy Kata Eszter

Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar, Óbudai Egyetem, 1034 Budapest, Bécsi út 94-96.

Absztrakt: A hibrid energiarendszerek megbízhatósága és fenntarthatósága egyre meghatározóbb szerepet tölt be a modern energiagazdálkodásban és a klímaváltozás elleni küzdelemben. A hidrogénalapú hibrid rendszerek lehetőséget kínálnak a megújuló energiaforrások – elsősorban nap- és szélener-gia – ingadozásából adódó problémák, a hálózati stabilitás és az energiatárolás kihívásainak mé-rséklésére. Az Európai Hidrogénstratégia (2020) és a RePowerEU (2022) a hibrid energiarendszerek fejlesztését helyezi előtérbe, támogatva a zöldhidrogén-termelést, a villamosenergia- és gázpiac integrációját, valamint az Európai Unió 2050-es klímasemlegességi céljainak elérését. A Magyar Nemzeti Hidrogénstratégia (2021) a hazai energiarendszerben a hibrid rendszerek szerepét a megújuló alapú hidrogéntermelés, az ipari és közlekedési alkalmazások, valamint a tárolási és konverziós technológiák – például Power-to-Gas (PtG) – bevezetésében látja. A tanulmány vizsgálja a környezeti, gazdasági és technológiai összefüggéseket, különös tekintettel az elektrolízis és üzemanyagcella-technológiák költségcsökkenésére, a jogi és szabályozási ke-retek fejlődésére, valamint hazai és regionális lehetőségekre, együttműködésekre. Az elemzés rávilágít, hogy a hidrogénalapú hibrid energiarendszerek kulcsszerepet játszhatnak a rugalmas, karbonsemleges és biztonságos energiahálózatok kialakításában Európában és Magyarországon egyaránt.

A new type of microscopic ellipsometer utilizing point-like light source

Berhane Nugusse Zereay^{1,3,4} Péter Petrik^{1,5}, and Miklós Fried^{1,2,*}

1 Institute of Technical Physics and Materials Science, HUN-REN Centre for Energy Research, Budapest, Hungary

2 Institute of Microelectronics and Technology, Óbuda University, Budapest, Hungary

3 Doctoral School on Materials Sciences and technology, Óbuda University, Budapest, Hungary

4Mai Nefhi College of Science, Asmara, Maekel, Eritrea

5 Department of Electrical Engineering, Institute of Physics, Faculty of Science and Technology, University of Debrecen, Debrecen, Hungary

E-mail: fried.miklos@ek.hun-ren.hu

Abstract: We developed and applied a new microscopic ellipsometer using a point light source. Our device can use direct or virtual point light source with a polarizer. It is without imaging optical elements, lenses, and mirrors, so there is no depth of field problems. It is multicolor (RGB) without moving parts. The angle-of-incidence is varied point-by-point so a special optical calibration method is needed using appropriate SiO₂/Si substrate sample. After the calibration, Au/C/SiO₂ on Si substrate and Au/Ag/SiO₂ on Si Substrate samples were measured and analyzed: to determine the precision. The lateral resolution is better than 5 micron and a very high thickness precision. The device can be effectively used in biotechnology and medical fields, for a variety of purposes, including: Early tumor diagnosis, detection of clinical therapeutic markers, monitoring the binding of various molecules to surfaces, tracking environmental pollutants Our new microscopic ellipsometer, which is developed using cheap parts, is faster , more stable and covers a wider area compared to its corresponding conventional ellipsometers. The basis of the work is a patent from our Institute: Major C, Fried M, Horváth Z Gy, Juhász G, Petrik P: Patent pending: P2400376, 2024.

Keywords: microscopic ellipsometry, multicolour, imaging, point-like source

HCHiP – Új, innovatív lehetőség Magyarországon

A.E.Pap

Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Közhasznú Nonprofit Kft, Budapest, Kondorfa
utca 1. H-1116

Az Európai Unió „Europien Chips Act”-je nyomán [1], a Digital Europe támogatásával, 30 chip kompetencia központ (CCC – Chip Competence Centre) kezdte meg működését 2025. március 1-vel. Ezen központok egyike a Magyar HCHiP – Félvezetőtechnológiai Kompetencia Központ, mely a Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Közhasznú Nonprofit Kft vezetésével a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, valamint a HUN-REN Energiatudományi Kutatóközpont részvételével alakult meg. Küldetésünk, Magyarország versenyképességi stratégiájával összhangban [2], hogy olyan szakmai bázist hozzunk létre, amely összeköti a félvezetőipar szereplőit a korszerű technológiai megoldásokkal, az európai szintű kutatási és fejlesztési törekvésekkel, valamint elősegíti az ipari, tudományos és szakpolitikai együttműködéseket. A HCHiP szerepe túlmutat egy egyszerű információs vagy technológiai központén: célja, hogy a hazai szereplők versenyképesebbé váljanak a globális piacokon, bekapcsolódjanak a nemzetközi innovációs láncokba, és aktívan részt vegyenek az európai uniós technológiai kezdeményezésekben.



[1] Digital sovereignty: Commission proposes Chips Act

[2] Magyarország Kormánya - Magyarország versenyképességi stratégiája 2024-2030

Petri-hálón alapuló modell elektromos járművek töltésének szimulációjára

Szűcs István ¹, Kopják József ²

1 Alkalmazott Informatikai és Alkalmazott Matematikai Doktori Iskola Óbudai Egyetem, Budapest, 1034

2 Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar, Óbudai Egyetem, Budapest, 1034

Absztrakt: Az elektromos járművek rohamos terjedése világszerte új kihívásokat támaszt a villamosenergia-hálózatokkal szemben. A töltési igények gyors növekedése komoly terhelést okoz az elosztóhálózatokon, ezért egyre nagyobb szükség van intelligens, költséghatékony teljesítményelosztási megoldásokra, amelyek képesek az elérhető hálózati kapacitás kihasználására anélkül, hogy költséges hálózati bővítésekre lenne szükség. Kutatásunk célja a teljesítménymenedzsment algoritmusok modellezési lehetőségeinek vizsgálata. A modellt hibrid Petri-hálózat segítségével valósítottuk meg, amely lehetővé teszi számunkra, hogy a töltési folyamat folytonos (például a töltési karakterisztika és a töltő kimeneti teljesítményének korlátozása) és diszkrét (vezérlési logika, események) aspektusait egyaránt modellezzük. A modellt a Snoopy szimulációs környezetben implementáltuk, ahol reprodukáltuk a váltakozó áramú (AC) töltők jellegzetes töltési karakterisztikáját, és megvalósítottunk egy kimeneti teljesítménykövető mechanizmust, amely az aktuális töltési állapot függvényében dinamikusan módosítja a kimeneti teljesítménykorlátot. A szimuláció eredményei megerősítik, hogy a hibrid Petri-hálók hatékonyan alkalmazhatók az elektromos járműtöltés folyamatának modellezésére és elemzésére. A kutatás rámutat arra is, hogy a Petri-hálók rugalmassága lehetővé teszi a későbbi kiterjesztést több töltőpontot magában foglaló teljesítményelosztó algoritmusok szimulálására. A jövőbeni kutatások célja a modell továbbfejlesztése: különböző teljesítményelosztó- és vezérlési stratégiák összehasonlítása. Az eredmények alapján a Petri-hálón alapuló megközelítés ígéretes eszköz az elektromos járműtöltés és az energiaelosztás optimalizálásának támogatására.

Források:

- [1] K. Clement-Nyns, E. Haesen, and J. Driesen, "The Impact of Charging Plug-In Hybrid Electric Vehicles on a Residential Distribution Grid," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 25, no. 1, pp. 371–380, Feb. 2010. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5356176/>
- [2] G. Heydt, "The Impact of Electric Vehicle Deployment on Load Management Strategies," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-102, no. 5, pp. 1253–1259, May 1983. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4112061/>

- [3] A. D. Febbraro, D. Giglio, and N. Sacco, "A hybrid Petri net model for performance analysis of electric transit systems with fast battery charging," in 2019 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2019 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe). Genova, Italy: IEEE, Jun. 2019, pp. 1–6. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8783353/>

Árammérés mezőorientált állandómágnesez szinkronmotor-hajtásokban

Mark Wendler ¹, Kopják József ², Sebestyén Gergely ²

1 Alkalmazott Informatikai és Alkalmazott Matematikai Doktori Iskola Óbudai Egyetem, Budapest, 1034

2 Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar, Óbudai Egyetem, Budapest, 1034

Absztrakt: A pontos árammérés a mezőorientált szabályozás (field-oriented control, FOC) egyik alapja az állandómágnesez szinkronmotoroknál (permanent magnet synchronous motor, PMSM). A fázisáramok mérésének pontossága befolyásolja a nyomatékszabályozást, a dinamikus viselkedést és a hajtás hatásfokát. A leggyakoribb áramérzékelési megoldások – három-, két- és egyszöntös kapcsolások – pontossága, költsége és műszaki követelménye kerülnek elemzésre. A kutatásban nagyobb hangsúlyt kap az egyszöntös megközelítésre, amely egyszerűíti az áramkört, ugyanakkor jelrekonstrukciós kihívásokat okoz. Az alacsony modulációs index és szűk impulzusszélesség esetén szigorúbb követelményeket helyez az analóg–digitális átalakítóra, a mintavételezés időzítésére és a jelillesztésre. A tárgyalt megoldások rendszerszintű követelményeket támasztanak az analóg jelillesztéssel, a mintavételezési idő megválasztásával és a rekonstrukciós eljárásokkal szemben.

Források

- [1] M. Wendler, J. Kopják, I. Szűcs, and I. Bendiák, “Enhancing Sensorless Start-Up in PMSM: Analysis and Optimization of Open-Loop Technique for Smooth Transitions,” in 2025 IEEE 23rd World Symposium on Applied Machine Intelligence and Informatics (SAMI 2025), Stará Lesná, Slovakia: IEEE, Jan. 2025.
- [2] K. Ohnishi, “Investigation of Torque Evaluation and Optimum Structure of Permanent Magnet Motors,” IEEJ Trans. IA, vol. 115, no. 7, pp. 930–935, 1995, doi: 10.1541/ieejias.115.930.
- [3] A. Szántó, S. Hajdu, and G. Á. Sziki, “Dynamic simulation of a prototype race car driven by series wound DC motor in Matlab-Simulink,” Acta Polytech. Hung. vol. 17, no. 4, pp. 103–22, 2020.

Fények a vályúnál - A mesterséges megvilágítás szerepe és hatása a sertéstenyésztésben

Csikász Levente

Óbudai Egyetem, Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar

csikasz.levente@stud.uni-obuda.hu

Nádas József

Óbudai Egyetem, Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar

nadas.jozsef@kvk.uni-obuda.hu

Molnár György

Óbudai Egyetem, Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar

molnar.gyorgy@uni-obuda.hu

Absztrakt: A világítás szerepe a sertéstelepeken nem csak a megfelelő láthatóságért felelős. Közvetlen hatással van az állatok viselkedésére, hormonháztartására és termelési teljesítményére. Kutatásunk a LED világítás spektrális optimalizációját vizsgálja. Nappal semleges fehér fény (CCT 4000–4500 K) a kék (450–495 nm) és zöld (495–570 nm) komponensekkel serkenti az aktivitást és az étvágyat, míg éjszaka a borostyán-vörös fény (620–650 nm) biztosítja a nyugodt körülményeket, miközben ezzel a telepi dolgozók biztonságát is biztosítja. Esettanulmányunkban egy ipari lámpatest sertéstelepi adaptációját mutatjuk be, amelyben az optikai és spektrális módosítások mellett empirikus igényfelmérés és telepi kísérleti vizsgálatok is tervezettek. A rendszer előre vetített hatásai különösen a hízósertéseknél, kocáknál és választás előtt álló malacoknál mutatkoznak meg. Csökkenti a stresszt, javítja a növekedési és szaporodási mutatókat, valamint segíti az állatok jólétének fenntartását. Ezzel párhuzamosan csökken az energiafelhasználás és az üzemeltetési költség. A kutatásunk középpontjában nem csupán a világítás technológiájának fejlesztése, hanem új távlatok és megoldási lehetőségek megnyitása a precíziós, állatbarát és fenntartható sertéstartásban, közvetlen gazdasági előnyt kínálva a telepek számára, hozzájárulva az alternatív világítástechnikai és vezérléstechnikai megoldásokhoz.

Kulcsszavak: mesterséges megvilágítás, LED technológia, világításvezérlés, innováció

Introduction into the Dynamic Normalising Method for Sinusoidal Signals

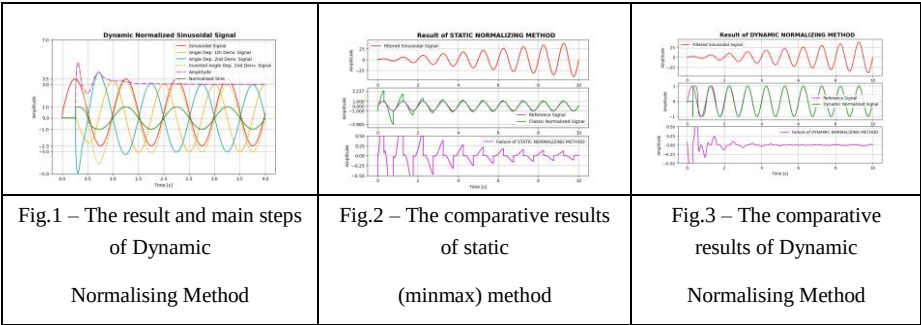
Árpád Handler ¹, József Kopják ², Szilárd Jagasics ³

1 The Doctoral School of Applied Informatics and Applied Mathematics, Óbuda University, Budapest, Hungary

2 Kandó Kálmán Faculty of Electrical Engineering, Óbuda University, Budapest, Hungary

3 Hardware Development Dept., thyssenkrupp Comp. Tech. Hungary Ltd., Budapest, Hungary

Abstract: Normalization is a scaling process which is used for scaling up or down before processing the signal[2]. Various approaches exist for online sine wave normalization, and most of them observe one or more periods of the signal before generating the normalized one. Among the techniques, minmax is widely used in rescaling the data[1][2]. This method needs to monitor one period before calculating the scaling factors. That is why it is called static in many cases. It is possible to do normalization with the help of estimated sine wave parameters. There are Least Squares based[3][4][5][6][7] and Kalman Estimator based[8] algorithms, which can estimate the amplitude, phase, frequency and offset parameters of the sinusoidal signals. Sine wave fitting methods are usable for ADC testing[4][5], where the effect of quantization is investigated. For reliable parameter estimation, it is advised by IEEE 1241-2010 to acquire a minimum of five complete periods of the signal[5]. For less than two signal periods can result in parameter divergence[5]. According to a former research, it is possible to use sine wave fitting methods in case of low frequency vibrations with about one fifth period[3]. Kalman Filter is a useful method for estimating the actual and the future state of power grid behaving[8]. The Dynamic Normalizing Method for Sinusoidal Signals gives an alternative process (fig.1) for transforming the signal into the range of [-1..+1]. The proposed method gives the normalized result within one period of the signal, from sample to sample with higher signal processing frequency. The output of this method is compared to the minmax (Static Normalising) method (fig.2 and fig.3).



References

[1] L.d.F Costa, Data Normalization in Signal and Pattern Analysis and Recognition: A Modeling Approach, Sao Carlos Institute of Physics, 25th May 2022

[2] S. G. K. Patro, K. K. Sahu, Normalization: A Preprocessing Stage, DOI: 10.17148/IARJSET.2015.2305, Article in IARJSET, March 2015, 2015. [3] R. Hentschke, B. Schurmann, J. Rabe, J. Chem. Phys. 96 (1992) 6213

[3] Z. Liang, D. Ren, J. Sun, Z. Zhu, Fitting algorithm of sine wave with partial period waveforms and non-uniform sampling based on least-square method, DOI:10.1088/1742-6596/1149/1/012019, Article in AIVELA 2018

[4] V. Pálfi, I. Kollár, Acceleration of the ADC Test With Sine-Wave Fit, Digital Object Identifier 10.1109/TIM.2013.2243500, IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT, VOL. 62, NO. 5, MAY 2013

[5] B. Renczes, V. Pálfi, A computationally efficient non-iterative four-parameter sine fitting method, IET Signal Process. 15(8), 562–571(2021). <https://doi.org/10.1049/sil2.12061>

[6] J. Kuffel, T. R. McComb, R. Malewski, Comparative Evaluation of Computer Methods for Calculating the Best-Fit Sinusoid to the Digital Record of a High-Purity Sine Wave, IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT, VOL. IM-36, NO.2, JUNE 1987

[7] X. Wang, Y. Luo, Z. Zhai, L. Yang, T. He, Algorithm for Sine Wave Curve Fit Based on Frequency Precise Estimation, 2017 International Conference on Mechanical, System and Control Engineering

[8] J. Palfi, The Future of Adaptive Grids using the Kalman Filter, for Data Smoothing and Data Prediction, Acta Polytechnica Hungarica, Vol.21, No. 10, 2024

- [9] Á. Handler, Sz. Jagasics, J. Kopják, Dynamic Normalising Method for Sinusoidal Signals, IEEE 23rd International Symposium on Intelligent Systems and Informatics (SISY 2025) : Proceedings, Budapest, Magyarország : IEEE Hungary Section (2025) 461 p. pp. 177-182. , 6 p.

Fig.3 – The comparative results of Dynamic

Normalising Method

Fig.1 – The result and main steps of Dynamic

Normalising Method

Fig.2 – The comparative results of static

(minmax) method

-----Kiadvány vége-----