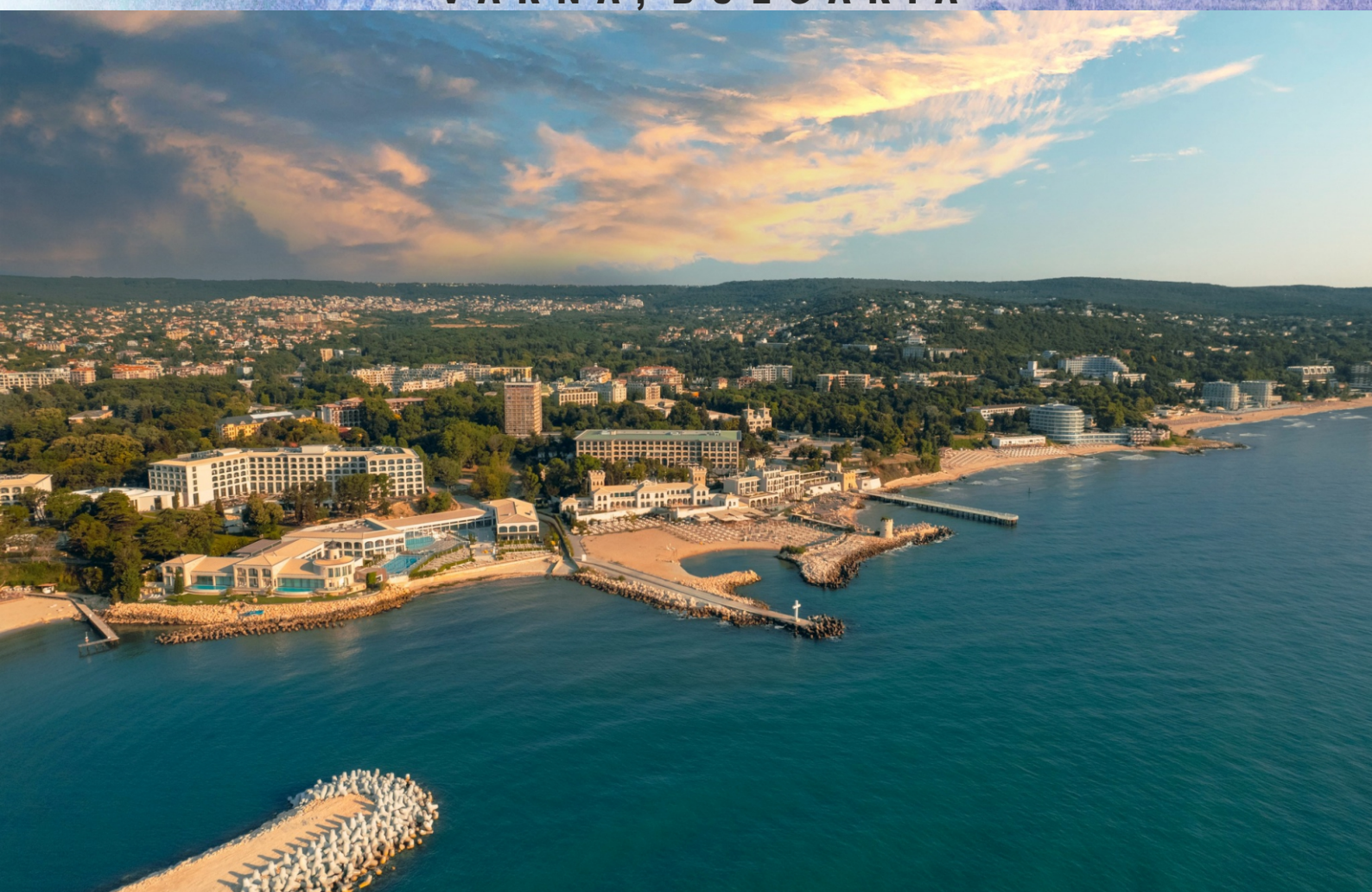


**XIV INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE**  
**TECHNICS. TECHNOLOGIES.**  
**EDUCATION. SAFETY**

**31 AUGUST - 03 SEPTEMBER 2026**  
**VARNNA, BULGARIA**



**ISSN 2535-0315 (Print)**

**ISSN 2535-0323 (Online)**

**ORGANIZERS**  
**SCIENTIFIC -TECHNICAL UNION OF MECHANICAL ENGINEERING**  
**“VASIL LEVSKI” NATIONAL MILITARY UNIVERSITY**



INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE

**TECHNICS. TECHNOLOGIES.  
EDUCATION. SAFETY. 2026**

# **PROCEEDINGS**

YEAR X,  
ISSN 2535-0315(Print),  
ISSN 2535-0323 (Online)  
ISSUE 1 (19),  
VARNA, BULGARIA 2026

**SUBJECTS:**  
TECHNICS. TECHNOLOGIES.  
INFORMATION TECHNOLOGIES, NATURAL AND MATHEMATICAL SCIENCES.  
EDUCATION. PUBLIC SCIENCES.  
SECURITY. MILITARY SCIENCES.

01-04.09.2025  
VARNA, BULGARIA  
**[www.techtos.net](http://www.techtos.net)**

All articles are published after peer review by two independent reviewers.

**Publisher:** Scientific technical union of mechanical engineering  
“Industry - 4.0”

## INTERNATIONAL EDITORIAL BOARD

### Members:

|                                                       |                                                                                                                 |
|-------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Div. Gen. Dr. Hab. Boguslaw Pacek</b>              | Academy of National Defence, Warsaw, Poland                                                                     |
| <b>Prof. Dr. Vanya Banabakova</b>                     | Vasil Levski National Military University                                                                       |
| <b>Assoc. Prof. Dr. Igor Penkov</b>                   | Tallinn University of Technology, Estonia                                                                       |
| <b>Prof. DSc. Igor Taratorkin</b>                     | Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Russia                                                          |
| <b>Prof. Dr. Jan Furch</b>                            | University of Defence in Brno – Czech Republic                                                                  |
| <b>Col. Prof. Dr. Hab. Mariusz Wiatr</b>              | Land Forces Military Academy, Wrocław, Poland                                                                   |
| <b>Prof. DSc. Eng. Mitko Nikolov</b>                  | Rousse University – Angel Kanchev – Bulgaria                                                                    |
| <b>Assoc. Prof. Dr. Nebojsa Bojanic</b>               | University of Sarajevo, Bosnia and Herzegovina                                                                  |
| <b>Prof. Dr. M. Niyazi Eruslu</b>                     | Yalova University, Turkey                                                                                       |
| <b>Assoc. Prof. Dr. Oleg Stelya</b>                   | National University named Taras Shevchenko, Kiev, Ukraine                                                       |
| <b>Assoc. Prof. Dr. Eng. Petar Simonovski</b>         | Saints Cyril and Methodius University, Skopje, North Macedonia                                                  |
| <b>Assoc. Prof. Dr. Rozalia Kuzmanova – Kartalova</b> | University of Veliko Tarnovo                                                                                    |
| <b>Prof. Dr. Eng. Sabin Sabev</b>                     | University of Agribusiness and Rural Development, Plovdiv, Bulgaria                                             |
| <b>Assoc. Prof. Dr. Svilen Rachev</b>                 | Technical University of Gabrovo                                                                                 |
| <b>Colonel Assoc. Prof. Dr. Eng. Svilen Stefanov</b>  | Vasil Levski National Military University                                                                       |
| <b>Prof. DrSc. Eng. Vladimir Musiyko</b>              | National Transport University of Ukraine                                                                        |
| <b>Assoc. Prof. Dr. Volodymyr Zhavoronkov</b>         | National Aviation University of Ukraine                                                                         |
| <b>Assoc. Prof. Dr. Yavor Boychev</b>                 | Institute of Metal Science Equipment and Technologies with<br>Hydroaerodynamics Centre "Acad. A Balevski" - BAS |
| <b>Assoc. Prof. Dr. Yordan Hristov</b>                | Vasil Levski National Military University                                                                       |
| <b>Prof. Dr. Zelimir Kesetovic</b>                    | University of Belgrad, Serbia                                                                                   |

# CONTENTS

## **TECHNICS. TECHNOLOGIES.**

|                                                                                                                                                                                                                                                          |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Concept of real-time health monitoring of engineering structures during operation</b><br>Leonid Vinogradov, Maris Hauka, Juris Gutans, Yulija Soldatova, Alekseij Nassibulin, Mihail Podkoritov .....                                                 | 7  |
| <b>Peculiarities of regional development of cruise tourism in the Mediterranean</b><br>Yevheniia Kryzhanovska .....                                                                                                                                      | 11 |
| <b>Eco-Efficiency and Service Quality as Dual Drivers of Competitiveness in Liberalized Suburban Rail Transport</b><br>Kostadin Trifonov .....                                                                                                           | 15 |
| <b>Transmission of information from a bottom station for underwater monitoring to a floating radiobuoy via a hydroacoustic channel</b><br>д-р инж. Коларов А. П., гл. асистент д-р инж.Найденев Р. В. ....                                               | 18 |
| <b>Research into the mechanism of influence of underwater communication with hydroacoustic modems on the operation of a hydrophone during the exchange of information from it</b><br>Главен асистент д-р инж.Найденев Р. В., д-р инж. Коларов А. П. .... | 22 |
| <b>Measurement of underwater ship noise in deep water</b><br>Бистра Ненова .....                                                                                                                                                                         | 26 |
| <b>Jaming of underwater acoustic communications</b><br>Ivanov I., Kolev St., Lolov M. ....                                                                                                                                                               | 29 |
| <b>Development of a microphone array for monitoring and detecting sources of acoustic signals</b><br>assoc. prof. Nesterov K.N. PhD, Pehlivanski V.I. PhD, Liaskov N.G., Penev N.P. ....                                                                 | 32 |
| <b>Crystallization process control of cast explosive charges using x-ray radiography</b><br>Assoc. Prof. Krumov A., PhD., Assoc. Prof. Simeonova A., PhD. ....                                                                                           | 37 |
| <b>Development of a high tech system for vacuum melting and casting of organic nitro compounds</b><br>Assoc. Prof. Krumov A., PhD., Assoc. Prof. Simeonova A., PhD. ....                                                                                 | 39 |
| <b>Честотно-зависим избор на подмасив за ограничаване на пространствения алиасинг в компактен петелементен линеен микрофонен масив</b><br>Владимир Върбанов .....                                                                                        | 42 |
| <b>Macrosimulation-based evaluation of a planned urban arterial: the extended branimirova street in sesvete, Zagreb</b><br>MSc Toni Tomić, Dr. Karlo Babojelić .....                                                                                     | 45 |
| <b>Comparative analysis of some methods for calculation of two way reinforced concrete slabs</b><br>Anton Gorolomov .....                                                                                                                                | 48 |
| <b>Multi-parameter assessment of the relative electrochemical condition of reinforced concrete structures exposed to stray currents and chloride environments</b><br>Veis Šerifi, Nazim Manić, Emir Maslak, Vesnera Šerifi .....                         | 52 |
| <b>Quantitative Risk Assessment in Bulgarian Road Tunnels: Traditional Assessment Model vs. Probabilistic Modeling-Based Models</b><br>Евелина Иванова, Стефан Крачунов .....                                                                            | 57 |
| <b>Example of a Model for Experimental Study on Carbon Dioxide Variation in the Passenger Compartment of a Motor Vehicle</b><br>Evelina Ivanova, Stefan Krachunov .....                                                                                  | 63 |
| <b>Modified bearing assembly of an experimental prototype for three-point impact bending</b><br>Маг. Инж. Теодор Атанасов .....                                                                                                                          | 69 |
| <b>Technology and selected properties of products made from polymer composites containing recycled rubber and mineral filler</b><br>Assoc. Prof. PhD. Eng. Tomasz Garbacz, MSc. Eng. Karol Risinski .....                                                | 71 |

## **INFORMATION TECHNOLOGIES, NATURAL AND MATHEMATICAL SCIENCES.**

|                                                                                                                                                    |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Security evaluation metrics for an adaptive steganographic method based on the Cannyalgorithm</b><br>Veselka Stoyanova, Veselina Gagamova ..... | 72 |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|



|                                                                                                                                                                                                                                                                    |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Zkap anti-corruption output filter: a cryptographically verifiable compliance protocol for the deployment of artificial intelligence in investigative, regulatory, supervisory and judicial procedures</b><br>Radoslav Y. Radoslavov, Eng. Ivan Y. Getsov ..... | 76 |
| <b>Examine of electrical conduction processes in blood vessels by cable theory</b><br>Natela Zirakashvili .....                                                                                                                                                    | 82 |
| <b>Моделиране и изследване на дифракционното поле от дрон с използване на Фурие трансформация</b><br>Иван Гарванов, Магдалена Гарванова, Мария Миндова, Деян Дънешки .....                                                                                         | 85 |
| <b>Сравнителен анализ на алгоритми за възстановяване на разфокусирани изображения</b><br>Магдалена Гарванова .....                                                                                                                                                 | 90 |

## **EDUCATION. PUBLIC SCIENCES.**

|                                                                                                                                                                                                              |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Stakeholders' Attitudes toward the Assessment of the Quality and Effectiveness of Inclusive Education: Results of a Survey Study</b><br>Ivanka Yankova, Silviya Stancheva, Kamelia Nusheva .....          | 94  |
| <b>Дигиталните технологии като средство за взаимодействие между библиотечното образование и библиотечните ресурси</b><br>Паола Любенова, Иван Хаджиев .....                                                  | 98  |
| <b>Divorce through the prism of anti-crisis management Развод сквозь призму антикризисного управления</b><br>Проф. д-р Събев С. ....                                                                         | 102 |
| <b>Crisis management of microenterprises in Bulgaria</b><br>Проф. д-р Събев С. ....                                                                                                                          | 105 |
| <b>Artificial intelligence in learning and development: transofrming corporate learning</b><br>Yoana Stefanova .....                                                                                         | 109 |
| <b>Continuing professional development of pedagogical specialists and its effect on the management of change in school</b><br>Nikolina Dimitrova Chusheva, Assoc. Prof. Dr. Miroslav Kirilov Terziyski ..... | 112 |
| <b>Methodological aspects of applying generative artificial intelligence in the development of examination tests in building construction</b><br>Assoc. Prof. Dr. Arch. Ilieva Y. ....                       | 115 |
| <b>Music history knowledge, skills, and competencies in the professional training of prospective music teachers</b><br>д-р Панчева-Георгиева А. Н. ....                                                      | 119 |
| <b>Main aspects of the conductor's gesture as a manual-plastic model of the sound of a musical work</b><br>Hristo A. Atanasov .....                                                                          | 122 |
| <b>The conductor's position as part of the active process of recreating the musical work</b><br>Hristo A. Atanasov .....                                                                                     | 124 |
| <b>Beyond Reproductive Autonomy: Three Ethical Arguments for Normalizing Elective Oocyte Cryopreservation in an Age of Reproductive Crisis</b><br>Aleksandra Traykova .....                                  | 126 |

## **SECURITY. MILITARY SCIENCES.**

|                                                                                                                                                                      |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>A competency model for training specialists in biological security in the context of bioconvergence</b><br>Nenovska, M. I., Ph.D, Chief Assistant Professor ..... | 127 |
| <b>Modular UAV Architectures in the Support of National Weapon Integration</b><br>István Papp, Bertold Békési .....                                                  | 131 |
| <b>Features in the design of unmanned aerial vehicles aircraft type</b><br>Sabi S Minev .....                                                                        | 134 |
| <b>Characteristics of the materials used in the design of unmanned aircraft aircraft type</b><br>Sabi S Minev .....                                                  | 138 |
| <b>Numerical Modeling of Smoothbore Barrel Shot</b><br>Assoc. Prof. Dr. Eng. Nikola Nikolov, Eng. Tsvetan Nikolov .....                                              | 142 |

|                                                                                                                                                        |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Some peculiarities of the security system elements development related to the implementation of the business plan for scientific research</b>       |     |
| Valeri Panevski1, Marina Hristova .....                                                                                                                | 146 |
| <b>Legal and administrative framework for the use of non-lethal means In law enforcement</b>                                                           |     |
| Adelina Tumbarska .....                                                                                                                                | 150 |
| <b>Development of a Multi-Layered Counter-Unmanned Aircraft System for Addressing Contemporary Security Challenges</b>                                 |     |
| Марина Христова .....                                                                                                                                  | 154 |
| <b>Application of virtual and augmented reality in radiation control training for nuclear power plant personnel</b>                                    |     |
| Dimitar Dimitrov, Nadejda Randelova .....                                                                                                              | 157 |
| <b>The Fundamental Attribution Error of Prison Staff Regarding Inmate Escapes</b>                                                                      |     |
| Assoc. Prof. Madzharov,Emil, PhD .....                                                                                                                 | 160 |
| <b>Tactical actions of drone swarms controlled by artificial intelligence in modern warfare: synergy with new technologies and focus on blockchain</b> |     |
| Prof. Nikolay Radulov .....                                                                                                                            | 164 |
| <b>A paradigm for future security. Security X.0</b>                                                                                                    |     |
| Prof. Nikolay Radulov.....                                                                                                                             | 170 |
| <b>Post-quantum security of blockchain постквантова сигурност на блокчейн</b>                                                                          |     |
| Д-р Личева, Т. ....                                                                                                                                    | 174 |
| <b>Geotechnologies in intelligence management геотехнологиите в управлението на разузнаването</b>                                                      |     |
| Д-р Личева, Т. ....                                                                                                                                    | 178 |





# Concept of real-time health monitoring of engineering structures during operation

Leonid Vinogradov<sup>1</sup>, Maris Hauka<sup>1</sup>, Juris Gutans<sup>1</sup>, Yulija Soldatova<sup>1</sup>, Aleksej Nassibulin<sup>2</sup>, Mihail Podkoritov<sup>3</sup>  
Institute of Machine Building, Aerospace Technology and Transport of Riga Technical University, Riga, Latvia<sup>1</sup>  
Latvian Council of Science, Riga, Latvia<sup>2</sup>

Laboratory of non-destructive testing Riga, Latvia<sup>3</sup>

leonids.vinogradovs@rtu.lv, Maris.Hauka@rtu.lv, Juris.Gutans@rtu.lv, Julija.Soldatova@rtu.lv, aleksejs.nasibulin@gmail.com, prontolv@inbox.lv.

**Abstract:** Due to the increasing complexity and cost of Engineering Structures, and consequently the growth of operating costs for maintaining the operational reliability of these structures, new approaches to monitoring their technical condition directly without decommissioning are required. Previously conducted studies have shown that the most effective method of such monitoring is non-destructive testing based on acoustic emission. This article presents the basic principles of organizing such monitoring during operation based on the "Technical Health Condition" (THC), "Structural Health Monitoring (SHM), Condition-based Monitoring (CBM)) or "Fail Safe Concept (FSC)"

**KEYWORDS:** ACOUSTIC EMISSION METHOD, MONITORING, ENGINEERING STRUCTURES, COMPOSITE MATERIALS.

## 1. Introduction

Scheduled periodic maintenance, routine preventative repairs, and the involvement of technical personnel in routine maintenance using non-destructive testing methods often lead to an unjustified increase in maintenance time and ongoing costs in terms of material, financial, and human resources. Often, especially in unfavorable weather conditions in open areas during operational conditions, the risk of human error increases when diagnosing the technical condition of a structure: the likelihood of missing real damage or misidentifying a defect, leading to equipment downtime. The Acoustic Emission (AE) method is based on the occurrence and propagation of AE waves during the formation and development of defects in the body of the monitored Structural Significant Item (SSI).

Acoustic emission signals differ from those generated by other non-destructive testing methods in their greater diversity, which means greater flexibility in selecting the most sensitive and stable signal parameters best suited to the given operating conditions and design features of the SSI.

## 2 Key Stages of Real-Time Engineering Structures Monitoring (SHM) During Operation

### 2.1 Study of Loads Acting on Structures and its SSI during operation

Before developing an engineering design, at first it is necessary to study the structure's loading status and its SSI in operation, paying particular attention to critical loading situations that could lead to the loss of the structure's functionality or a reduction in its reliability and safety. When studying the structure's loading under adverse operating conditions, as well as the occurrence of possible abnormal and critical situations, the designer must consider the possibility of installing the necessary embedded AE sensors in the design or its SSI in locations that attract particular attention. This should also include protection from environmental influences and the ability to provide the sensors with a continuous, uninterrupted power supply. Typically the most hazardous locations are associated with fatigue-sensitive (fatigue prone [FP]) SSI. The best calculation method for determining such places is the finite element method, which indicates weak points from the FP point of view and which must be confirmed by strain gaging, fiber optic sensors and / or sensitive coatings when measuring loads in various operating modes, including the ultimate ones. It is necessary to subsequently confirm the actual bearing capacity of the SSI during bench tests, with simultaneous processing and analysis of signals from built-in AE sensors, studying various parameters of AE signals in order to select the most sensitive and effective parameter, as a diagnostic feature using STATIONARY systems for processing and analyzing AE signals, as well as the design development of the sensor power supply and its protection from the environmental effects. It is recommended that for particularly hazardous locations, to apply the FSC [4,5] SSI principle of safe destruction may be considered. [1-5]

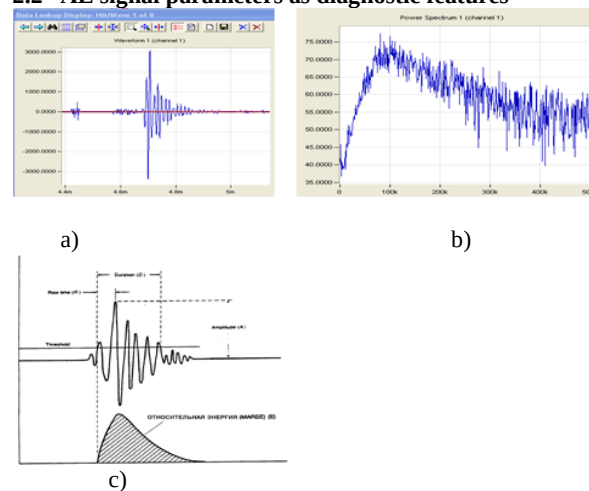
The advantage of using non-destructive AE testing lies in its integrality and the wide variety of diagnostic features of the AE signal. Another advantage is the lack of need for signal level measurement, as a qualitative image is sufficient, significantly reducing the likelihood of error in signal interpretation and simplifying its interpretation.

By analyzing acoustic emission signals, it is possible to assess the technical condition of ICE parts such as injectors, intake/exhaust valves, crankshafts, cylinder-piston groups, etc. It is particularly important to detect defects in the intake/exhaust valves, crankshaft, internal combustion engine shaft, as these are the most expensive parts of the power equipment [4,5].

The AE method uses the radiation of mechanical waves from the material due to dynamic changes in the internal structure of the material caused by any kind of loading. AE can be caused by plastic deformation, crack

formation and growth, fluid / gas flow in pipelines, corrosion, loss of oil layer between rubbing parts (increased friction), gas / fluid flow in defects and other deformations of solids. It can be assumed that AE signals in materials are caused by a change in pressure, stress or temperature.

### 2.2 AE signal parameters as diagnostic features



**Fig. 1** Standard set of parameters of the acoustic emission signal (pulse), measured by diagnostic systems (devices); a) - pulse shape; b) - pulse power spectrum; c) - formalization of pulse parameters

Fig.1 shows that the structure of the AE signal is quite diverse. Each of the signal shape parameters, namely amplitude, duration, time to reach maximum pulse (amplitude), number of micropulses, as well as derivatives (damping factor, signal power, energy, total energy, intensity, and frequency spectrum), can serve as informative parameters associated with a particular physical process causing this signal in the material continuum.

Clearly, the AE method is also recommended for monitoring SSI of composite materials, the results of which can be used in the development of new materials.[5,6]

### 2.3 Setting up the collection and accumulation of AE monitoring data

After identifying critical design weaknesses and selecting diagnostic features for the AE signal, it is necessary to develop communication schemes between the sensors and their archiving location(s) and the method for transmitting them for analysis by non-destructive testing specialists (non-destructive testing inspectors) to the Signal Processing Center (SPC) on stationary AE systems.

Stationary AE systems will display the main types of graphs: line/point, cumulative, distribution (histograms), rotated 3D distributions, waveform graphs, fast Fourier transform, etc. obtain parameters of time processes, such as the center of gravity of the spectral characteristic, from recorded data; process time processes or signal classification results in combination with AE pulse data, location results, parametric data, etc.

After analyzing the transmitted signals, the Central Office analysts make decisions about the current state of the structure and SSI and the need for additional inspections using other non-destructive testing methods.

The following principles for collecting accumulated AE data were considered:

- data transfer to an external storage device (flash drive, memory bank);
- Wi-Fi transmission to a receiving mobile device or a stationary AE system;
- a built-in indicator for exceeding the diagnostic limit state.

In any case, the decision on the criticality of the technical condition of the structure and its SSI and the suitability of its further operation is made by the responsible flaw detector.[7]

### 3. Examples of the application of acoustic emission in various engineering structures



Fig. 2. Heat exchanger in a heating boiler



Fig. 3. Leak test points for welded pipe joints



Fig. 4. Placement of a piezoelectric sensor and a strain gauge on the shock absorber rod mirror of an aircraft landing gear strut



Fig. 5. The aileron on test plant  
a strain gauge on the shock absorber rod mirror of 1 – Aileron, 2 – Load stand,  
an aircraft landing gear strut 3– Load hydraulic cylinder, 4 – Indicator

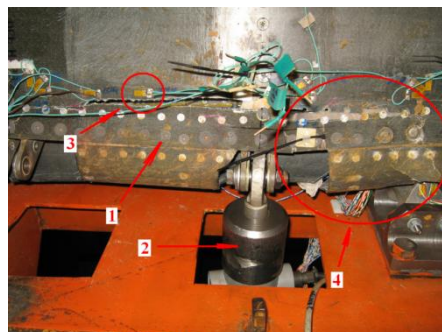
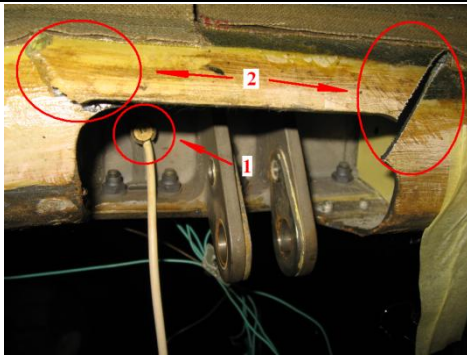


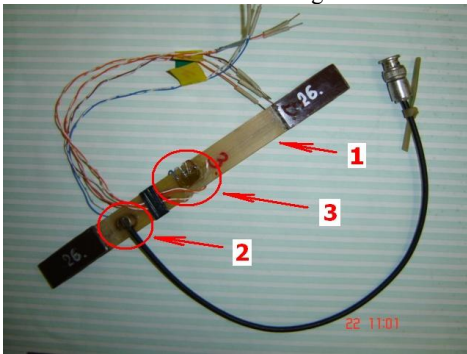
Fig.6. Failure of the lower aileron panel in the booster mounting area:  
1 – aileron,  
2 – booster, 3 – strain gauge;  
4 – failure zone



**Fig. 7.** Failure of the aileron tip: view of the upper panel in the area where the AE sensor is mounted: 1 – AE sensor, 2 – failure zone

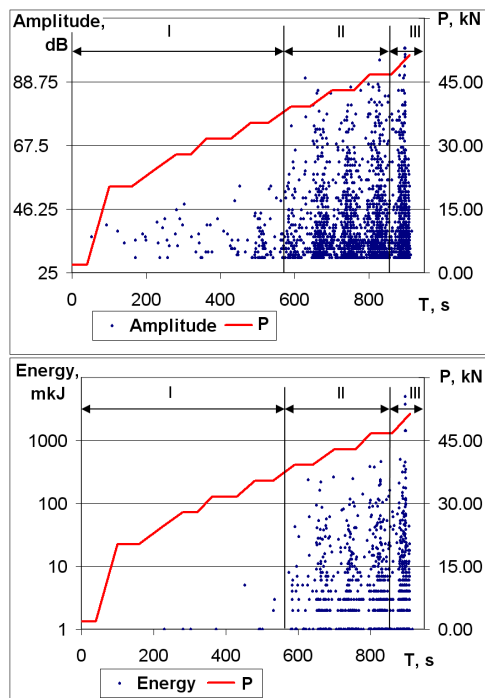
### Characteristic features of composite materials specimens Static fracture investigated

Scheme of the sensors' mounting

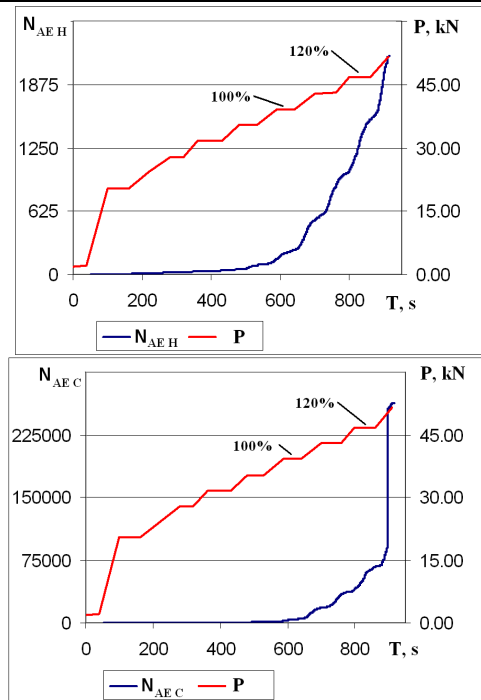


**Fig. 8.** 1- specimen, 2 - AE sensor, 3 - tensometry sensors

### Data Processing Results



**Fig. 9** 10 Graph of the AE signal amplitude loading cyclogram versus time. Graph of the AE signal energy loading cyclogram versus time.



**Fig. 11,12** Graph of the dependence of the number of AE signals and the loading cyclogram over time.

Graph of the dependence of the total AE count and the loading cyclogram over time.

As can be seen from the graphs above, once the load reached 100% of  $P_p = 3,668$  kg, cracks began to form, leading to the failure of the test specimen when the load reached 129% of  $P_p$  (5,070 kg). At the same time, at each stage beyond 100% of  $P_r$ , there is a significant increase in the number of oscillations and the number of pulses.

The graph showing the dependence of signal energy on time most clearly illustrates the failure process during the loading stages of the made, while the amplitude graph allows us to identify the types of failure processes in the composite material.[6-9]

The graph of the number of AE signals over time clearly demonstrates the process of crack formation in composite materials, while the graph of the total AE count indicates the moment failure.

For samples with a transverse fibre arrangement relative to the applied load, the process, both in deformation parameters and the parameters of the total AE, has two stages of damage accumulation: the stage of proportional changes in these parameters to the stress and the stage of intense increase of these parameters. The parameter of total AE shows that this process starts 5-6% sooner than shown by the deformation parameter.

For samples with a longitudinal arrangement of fibres in relation to the applied load one can judge the staging of the damage accumulation process by the characteristics of the total AE signals which can not be seen in the parameters of strain. For samples with no training or training with up to 20% of the breaking load, S-shaped behaviour of the total AE is preserved in each and every sample, characterising the three-stage process of damage accumulation. At the same time three-time and six-time training with small values of load (up to 20% of breaking load) has little influence on the behaviour of the curve of the total AE.

Three-time training for large values of load (from 35% of breaking load) has a strong influence on the behaviour of the curve of total AE and damage accumulation process takes a two-stage character.

However, in both the first and second cases, the training does not influence the durability limit under the given conditions of loading.



## DISCUSSION

Based on the results of numerous studies and tests of actual structures and their SSI, it can be concluded that the most effective, cost-efficient, and accessible method for monitoring the technical condition of full-scale engineering structures in real time during operation is the use of AE sensors embedded in the structure and its SSI, which allow for monitoring the technical condition of engineering structures

This approach makes it possible, without compromising the operational reliability of complex engineering structures, to significantly reduce the costs of maintaining the operational readiness of engineering systems of various purposes and complexity, has no impact on the environment, and minimizes energy consumption

## References

- [1] Vinogradovs L., Hauka M., Strautmanis G., Gutāns J., Soldatova J., Prokopenko V. Development of a methodology for improving the performance of diesel engines using the acoustic emission method. International scientific journal, YEAR XI ISSUE2/2026, , pp.83-85. ISSN 2534-8493.
- [2] Vinogradovs L., Strautmanis G., Gutāns J., Soldatova J., Prokopenko V. Development of as acoustic emission signal recording system. International scientific journal, YEAR X, ISSUE1/2025, , pp.9-11. ISSN WEB 2534-8493.
- [3] Vinogradovs L., Banov M., Nassibulin A. Acoustic emission method of diagnostic of elevating rudder covering in places of lightning strikes impact. International scientific journal, YEAR VII, ISSUE 2/2022, pp.47-49. ISSN WEB 2534-8493.
- [4] K. Carjova, M. Banov, L. Vinogradov, S. Kravchenko, and G. Strautmanis, "Acoustic Emission Method as a Means of Quality Control in Multilayer Welding of Thick-Walled Welded Joints," Latvian Journal of Physics and Technical Sciences, vol. 60, no. 4, pp. 40–51, Aug. 2023, doi: 10.2478/lpts-2023-0023.
- [4] V. Barat et al., "Assessment of the Structural State of Dissimilar Welded Joints by the Acoustic Emission Method," Applied Sciences, vol. 12, no. 14, p. 7213, Jul. 2022, doi: 10.3390/app12147213.
- [5] N. P. Aleshin, Ed., Metody akusticheskogo kontroli`a metallov. Moskva: Mashinostroenie, 1989.
- [6] R. M. Douglas, J. A. Steel, and R. L. Reuben, "A study of the tribological behaviour of piston ring/cylinder liner interaction in diesel engines using acoustic emission," Tribology International, vol. 39, no.
- [7] K. Carjova, M. Banov, A. Unbedahts, G. Strautmanis, L. Vinogradov, and I. Kurjanovics, "Characteristics of Mathematical Modeling of Acoustic Emission Method for Diagnosis of Fatigue Cracks in the Elements of Marine Power Plants," Latvian Journal of Physics and Technical Sciences, vol. 60, no. 5, pp. 3–14, Oct. 2023, doi: 10.2478/lpts-2023-0026.
- [8] Vinogradovs, L., Nasibullins, A., Banov, M., Soldatova, J., Gutāns, J. Experience of Applying the Acoustic Emission Method for Monitoring Systems. Trans Motauto World, 2024, Vol. 9, No. 2, 43.-45.lpp. ISSN 2367-8399. e-ISSN 2534-8493.
- [9] Vinogradovs L., Strautmanis G., Gutāns J., Soldatova J., Prokopenko V., Ivlijev A. Application of Acoustic Emission Method for the Diagnosis of Underground Gas Pipeline without Taking It out of Operation. Security & Future, 2024, Vol. 8, No. 3, pp.91-93. ISSN 2535-0668. e-ISSN 2535-082X.

## Peculiarities of regional development of cruise tourism in the Mediterranean

Yevheniia Kryzhanovska  
Nikola Vaptsarov Naval Academy, Varna, Bulgaria  
e.krizhanovska@nvna.eu

**Abstract:** This article examines current trends in the global cruise market, the development of "green corridors" and "responsible tourism", analyzes current issues in the Mediterranean cruise region, and proposes directions for its future sustainable development.

**Keywords:** AQUATIC ECOSYSTEMS, "GREEN CORRIDORS" CONCEPT, MULTIMODAL TRANSPORT, SUSTAINABLE DEVELOPMENT STRATEGY, RESPONSIBLE TOURISM, ENVIRONMENTAL SUSTAINABILITY.

**Introduction.** Cruise tourism is one of the fastest-growing and most investment-attractive segments of the international tourism market. The popularity of the cruise sector is based on the diversity of offerings from cruise companies (tour operators), the ever-increasing demand from cruise customers, and, consequently, the economic results achieved in this type of business. To maximize profits, cruise companies constantly seek new initiatives to increase their clientele, develop original strategies to address current and emerging challenges, innovate in passenger service and entertainment, offer various discounts and special offers, and utilize the cultural, historical, natural, and recreational potential of a particular region.

Today, the Mediterranean region ranks second globally, after the Caribbean, in popularity and volume of sea travel, yet its potential remains untapped. This highlights new opportunities and promising vectors for the development of this segment, and underscores the **relevance** of this study. The **aim** of this article is to identify the impact of current cruise industry trends on the dynamics of cruise tourism in the Mediterranean region and to identify promising areas for its further development.

### Analysis of the state of the problem and its research

Today, the cruise industry is one of the most successful, financially dynamic, and in-demand sectors of the economy, reaching new heights. With its high profitability, it is able to attract

and implement the latest advances in science and technology, redefining cruise voyages and thereby stimulating active cross-industry collaboration and partnerships with local and international ports, land and air transport, the hotel and restaurant business, tourism organizations, shipbuilding companies, and numerous financial, trade, cultural, medical, design, and other companies.

In the development of the cruise activity in recent years, a number of trends have emerged that indicate the industry is confidently moving toward scale, sustainability, and new travel formats. The trend toward "gigantomania" has not lost its popularity. Mass-market cruises, operated on enormous ships resembling "floating cities" or entire "floating resorts", with their own streets, parks, theaters, spas, swimming pools, and cultural and entertainment centers [7], remain popular among travelers. Giant new-generation ships are appearing on the cruise market, surprising potential travelers with new dimensions, exclusive services, and entertainment.

The emerging trend of "boutique cruises" – cruises as works of art, where style and content, rather than scale, are paramount – is gaining increasing popularity among tourists. Elite vacations are developing, offering unique, unconventional offerings for a limited number of discerning, high-budget travelers. An example of this is the innovative 2026 project: a cruise on a liner shaped like the 220-meter sailing ship Orient Express, inspired by the golden age of the French Riviera.

**Table 1:** Modern megaships.

| Ship                | Year of construction | Ship Yard                          | Length (m) | Width (m) | Speed (knots) | Number of passengers | Number of crew | Number of decks |
|---------------------|----------------------|------------------------------------|------------|-----------|---------------|----------------------|----------------|-----------------|
| Freedom of the Seas | 2006                 | Aker Finnyards Inc. u New Shipyard | 339        | 56        | 21,6          | 4370                 | 1360           | 15              |
| Oasis of the Seas   | 2009                 | STX Finland Cruise Oy              | 360        | 47        | 22,6          | 6880                 | 2200           | 18              |
| Allure of the Seas  | 2010                 | STX Finland Cruise Oy              | 362        | 60        | 22            | 6400                 | 1690           | 18              |
| Harmony of the Seas | 2016                 | STX France                         | 362        | 47,42     | 22            | 6780                 | 2100           | 18              |
| Icon of the Seas    | 2024                 | Meyer Turku                        | 365        | 48,47     | 22            | 7600                 | 2350           | 20              |
| Legend of the Seas  | 2025                 | Meyer Turku                        | 365        | 65        | 22            | 7600                 | 2350           | 20              |
| Star of the Seas    | 2025                 | Meyer Turku                        | 364        | 66        | 22            | 5610                 | 2350           | 20              |
| MSC Word America    | 2025                 | Chantiers de l'Atlantique          | 333        | 47        | 22,7          | 6762                 | 2138           | 22              |
| Disney Adventure    | 2025                 | MV Werften                         | 342        | 46        | 23            | 6700                 | 2300           | 20              |
| Norwegian Aqua      | 2025                 | Fincantieri                        | 322        | 41        | 22            | 4300                 | 1597           | 16              |
| Mein Schiff Flow    | 2026                 | Fincantieri                        | 333        | 42        | 22            | 4000                 | 1535deks       | 19              |
| MSC Word Asia       | 2026                 | Chantiers de l'Atlantique          | 333        | 47        | 22,7          | 6762                 | 2138           | 22              |
| Norwegian Luna      | 2026                 | Fincantieri                        | 322        | 41        | 22            | 4200                 | 1597           | 21              |

Note: The table was compiled based on data from a sources [1; 2; 3; 5; 6; 9; 10; 11; 12]

In recent years, more and more cruise companies have been emphasizing environmental friendliness as a competitive advantage for cruise transport. Cruise ships are currently under intense scrutiny due to their environmental impact. Greenhouse gas and pollutant emissions, waste and litter generation, air and water

pollution, and other factors negatively impact the planet's ecosystem.

Cruise companies are actively investing in alternative energy sources – LNG, biofuels, hydrogen, and electricity. This not only reduces emissions but also promotes a "clean" travel

image. After all, cruises of the future should be not only luxurious but also environmentally “responsible”. They should combine high technology, comfort, and environmental friendliness.

Cruise companies are equally actively investing in fleet modernization. Fleet renewal is becoming a necessity: modern liners generate higher revenues and allow them to maintain premium prices. Therefore, large corporations are gradually decommissioning or selling off obsolete vessels. Having found new operators, some of the vessels from the obsolete fleet and the so-called “idle fleet” are being returned to service after undergoing repairs and renovations at shipbuilding companies' docks (see Table 2).

In recent years, fierce competition and the desire to attract customers with unique offerings have pushed cruise

companies beyond the boundaries of established itineraries. Travelers are increasingly seeking unique experiences, not mass-market vacations. This includes both little-known regions and logistically challenging but impressive destinations. Arctic routes, Greenland, the South Atlantic, the African coast, and the rivers of South America are particularly popular with cruise tourists. Striving for uniqueness, cruise companies are forced to adapt itineraries to seasonal changes, climate change, and even geopolitical circumstances, resulting in the emergence of hybrid itineraries that combine sea and land, cruise and safari, north and south. Personalized itineraries, tailored to the interests of specific travelers, are increasingly the choice.

**Table 2:** Cruise ships that underwent renovation in 2025-2026.

| Ship            | Year of construction | Ship Yard          | Length (m) | Width (m) | Speed (knots) | Number of passengers | Number of crew | Number of decks |
|-----------------|----------------------|--------------------|------------|-----------|---------------|----------------------|----------------|-----------------|
| Disney Magic    | 1998                 | Fincantieri        | 294        | 32        | 21,5          | 2713                 | 950            | 11              |
| Carnival Legend | 2002                 | Kværner Masa-Yards | 293        | 32        | 22            | 2680                 | 930            | 12              |
| Norwegian Gem   | 2007                 | Meyer Werft        | 294        | 32        | 23            | 2873                 | 1070           | 15              |
| MSC Poesia      | 2008                 | Aker Yards         | 294        | 32        | 23            | 2550                 | 1039           | 16              |
| Valiant Lady    | 2021                 | Fincantieri        | 278        | 38        | 20            | 2770                 | 1160           | 17              |
| Brilliant Lady  | 2025                 | Fincantieri        | 278        | 38        | 20            | 2762                 | 1150           | 17              |

Note: The table was compiled based on data from a sources [1; 2; 3; 5; 6; 9; 10; 11; 12]

Despite numerous positive trends emerging in the global cruise industry and reflected in the Mediterranean market, a number of issues remain that negatively impact the development of cruise tourism and the regional tourism industry as a whole. The escalation of armed conflicts is causing significant damage to the cruise industry. MSC Cruises and Costa Cruises have announced adjustments to their travel plans due to the ongoing conflict in the Middle East. For example, passengers on the “MSC World Europa” have been offered a flexible alternative: they can transfer their bookings to other MSC Cruises itineraries or cancel their trip entirely with a refund. The liner itself will be relocated to the Caribbean [4].

Due to the protracted military conflict, the Black Sea route is also hampered in its development. The Azov-Black Sea basin is part of the Mediterranean Sea's maritime infrastructure. The tourism and recreational potential of seven states, once part of the Azov-Black Sea basin maritime complex [8] could form the basis of a promising alliance as a sustainable cruise destination with a unified strategy for **attracting global cruise fleet operators**. The Azov-Black Sea basin is essentially part of the Mediterranean cruise market, and therefore, this project would undoubtedly have a positive impact on the cruise business and the socioeconomic development of the region as a whole. In the current situation, cruise companies are focusing their attention on alternative destinations, as well as the river cruise segment.

#### **Vectors of cruise tourism development**

Today, the need for sustainable development is a major trend in the cruise sector. An innovative concept in the maritime and river industry is “green corridors” – designated shipping routes between ports created to facilitate the use of zero- or low-emission shipping solutions. This is a process of coordinated efforts across the entire value chain, involving ports, ship operators, fuel producers, and governments. Implementing the “green corridors” model requires developing a practical, structured path beyond disparate efforts, ultimately enabling the development of a holistic strategy for both sustainable transport and “responsible” tourism.

Managing the river as a single basin will allow for more effective solutions to various problems. Cross-border cooperation in river cruise shipping will help secure significant economic, social, and environmental benefits, as well as overcome potential

obstacles that often arise in multinational river basins due to political, economic, and operational differences. Cross-border cooperation in tourism aims to enhance the competitiveness of various entities, stimulate the effective integration of resources, and develop joint tourism products. This type of interaction will foster stronger cultural ties and economic growth across territories, as well as support sustainable development through the joint management of natural resources and cultural heritage. The success of cross-border cooperation depends on the speed with which legal and cultural barriers are overcome, as well as the coordination of government agencies, businesses, and local communities.

In this context, strategic alliances in the tourism sector are particularly important. Such associations of tourism entities offer significant benefits, including increased competitiveness, access to new markets and knowledge, collaboration on large-scale projects, infrastructure development, and much more. The multinational Danube-Black Sea region is ideally suited for this initiative, as it offers numerous advantages necessary for attracting tourists (natural and climatic resources, historical and cultural monuments, etc.). All of this will facilitate the expansion of tourism and recreational infrastructure, attract investment, and enhance the region's economic significance. It will also address a number of regional challenges, including the fragmentation of tourism products along the Danube River and the western Black Sea coast, the lack of well-established logistics, and logistical isolation from key tourism markets.

#### **DANUBE-BLACK SEA CRUISE ALLIANCE: a strategic framework for sustainable regional integration and tourism development (preview fragments)**

This paper presents a comprehensive conceptual framework for the creation of the Danube-Black Sea Cruise Alliance (DBCA) – a multinational cooperative initiative designed to position the Danube-Black Sea region as a unified, premium, and sustainable cruise destination. It argues that the historical fragmentation and logistical isolation of the region's tourism market can be overcome through a structured, multi-tiered alliance model.

**DBCA Structure:**

- institutional integration
- infrastructure harmonization
- cross-border product development
- joint marketing

The project outlines the alliance's strategic goals, key objectives, specific projects, and a phased expansion plan.

A key innovative component is the "AQUA-NEXUS" pilot project, which proposes a seaplane network to integrate the Danube Corridor with the Adriatic Sea, thereby solving a critical logistics challenge and creating a unique competitive advantage.

The report concludes that the DBCA model serves as a replicable template for transforming regional logistics and political challenges into synergistic opportunities for sustainable economic growth, improved connectivity, and pan-European tourism integration.

The **purpose** of the study is to present the conceptual framework for the DBCA as an innovative model of regional cooperation designed to overcome regional challenges.

The study's **main contribution** is the presentation of a comprehensive strategic plan aimed at addressing specific regional challenges using the innovative DBCA model, including a highly innovative pilot project ("AQUA-NEXUS"), which can be considered a benchmark for cross-border integration in tourism and transport.

**Problems Addressed:**

- **Strategic Coherence:** it provides a unified vision that transcends national borders and sectoral silos (tourism, transport, environment), which is often lacking in real-world regional planning efforts.

- **"AQUA-NEXUS" as a Benchmark:** the "AQUA-NEXUS" pilot project serves as a conceptual benchmark for demonstrating practical, cross-border integration.

- **Integrated Logistics:** it would likely model a seamless transport solution, potentially linking a Danube port directly to a Black Sea coastal route via efficient, sustainable multimodal transport (e.g., high-speed rail or upgraded inland waterways), thereby overcoming the "logistical isolation" problem.

- **Sustainable Tourism Model:** the project would likely integrate "blue economy" principles, showcasing how cruise and general tourism can operate sustainably while protecting the region's sensitive aquatic ecosystems. It would align with the real-world "Water-Energy-Food-Ecosystems" approach used in transboundary basins to maximize efficiency and reduce trade-offs across sectors.

- **Scalability and Replicability:** the paper would argue that the successes and lessons learned from the "AQUA-NEXUS" pilot project could be replicated and scaled across the entire Danube-Black Sea region, providing a practical model for future EU-funded initiatives.

The **project's value** is in creating a detailed, aspirational framework that combines existing best practices and theoretical models into a single, comprehensive, and potentially fundable strategy for sustainable regional development.

**The innovative pilot project: AQUA-NEXUS**

A current innovation is the AQUA-NEXUS project, which aims to create a seaplane network connecting Danube river transport with the Adriatic Sea. This multimodal logistics aims to increase the speed of transporting tourists and cargo, as well as integrate digital technologies to create immersive tourism experiences that engage local communities.

The project proposes the creation of a seaplane network integrating transport from the Danube to the Adriatic Sea. This innovative solution complements the cruise program by offering rich, themed excursions using digital technologies such as augmented reality and engaging local communities, supporting the principles of the "blue economy" and sustainable development.

The conceptual "AQUA-NEXUS" pilot project is considered a "game-changer" as a potential blueprint for a

seamless, multimodal transport and tourism corridor linking the Danube region and Black Sea with the Adriatic Sea. This project addresses logistical isolation and promotes sustainable, integrated transport solutions that could act as an economic catalyst for underserved regions and demonstrate successful cross-border cooperation.

The project is expected to open new economic opportunities for underserved regions and serve as a testament to the concept of comprehensive multinational cooperation in tourism and transport.

The conceptual "AQUA-NEXUS" pilot project aims to integrate with cruise tourism to create new "experience" class excursions by providing multimodal connectivity and focusing on rich, thematic content, thereby moving beyond traditional, fragmented port calls. This framework would facilitate deeper, more immersive, and personalized interactions through thematic excursions, augmented reality integration, and engagement with local communities.

**Expected results:**

1) Successful cooperation is expected to foster mutual understanding, strengthen stability, and enhance trust between neighboring communities and countries.

2) The project will be implemented using a phased expansion model. Bulgaria and Romania are invited to cooperate and integrate to form the core of the alliance and its Joint Governing Board, with subsequent expansion to other EU countries.

3) The governing structure designed to resolve political issues and cross-border problems will be the **Joint Council** of representatives of the participating countries.

Thus, the proposed "Danube-Black Sea Cruise Alliance" is a conceptual framework designed to integrate tourism and transport in the region by creating a seamless, innovative and environmentally responsible logistics network. The Alliance will function as a multilateral platform uniting governments, research institutes, private businesses (cruise and road transport companies, tour operators, travel agencies, excursion and information and advertising agencies), and local communities across the region. Within this framework, a formal cooperation mechanism will be established for policy exchange, regulation, and cross-border governance, necessary for navigating the complex geopolitical landscape of the Black Sea and Danube regions.

**Conclusion**

A study examining the development of cruise tourism in the current climate revealed that the cruise industry is confidently moving toward scale, sustainability, and new travel formats. The trend toward larger cruise liners, which implies the development of mass-market cruises, currently coexists successfully with the trend toward boutique cruises – elite travel for a select group of high-budget travelers where scale is not a concern, but rather an atmosphere of privacy, elegance, and deep immersion in the culture of each itinerary. "18+ cruises" – cultural and intellectual cruises that stimulate personal growth and spiritual development – are gaining particular popularity. Modern companies compete on the technical level and design of their ships, the standard of amenities, cultural, entertainment, and spa services, the implementation of high technologies and "green programs", and the development of original itineraries and exclusive offers.

However, in addition to positive trends in the cruise tourism sector, there are also negative ones that are hindering the development of the industry. In recent years, the Mediterranean cruise market has experienced uneven growth. Due to the unfavorable geopolitical situation in both the Middle East and the Black Sea, the maritime tourism industry has been experiencing fragmented growth and is not experiencing stable growth. Political instability, the inability to predict the situation and guarantee the safety of passengers and crews, have led to an imbalance in the regional cruise market's supply and demand.



Changes in cruise logistics for companies operating vessels in the Middle East are resulting in financial losses. In addition to paying numerous compensations and offering various alternatives to affected tourists, companies are forced to expend significant effort and resources to remove their expensive liners from the conflict zone and deliver them to safe ports. Cruise programs in this region are often cancelled for the entire season, with vacationers being offered alternative destinations. Consequently, the Middle East is no longer a stable or promising destination for the tourism industry, and the Black Sea-Azov Sea route is completely closed to tourists.

Thus, the creation of the Danube-Black Sea Cruise Alliance as a single, integrated brand will position the designated region as a unified, promising, and sustainable cruise destination, with significant potential for the creation of an innovative cruise product capable of integrating into the Mediterranean cruise region.

### References

1. Cruise Critic [<https://www.cruisecritic.com/>]
2. Cruise Mapper  
[<https://www.cruisemapper.com/>]
3. Cruisit.bg [<https://cruisit.bg/>]
4. Denisenkov, A. *MSC Cruises has announced the cancellation of Persian Gulf cruises*. TourDom, 2026.  
[<https://www.tourdom.ru/news/msc-cruises-obyavila-ob-otmene-kruizov-po-persidskomu-zalivu.html>]
5. Disney Cruise Line  
[<https://disneycruise.disney.go.com/en-eu/>]
6. iCruise [<https://www.icruise.com/>]
7. Kryzhanovska, Ye. *Modern problems of development of passenger water transport*. –Maritime law and industry, 2026.
8. Kryzhanovska, Ye. *Modern trends in the development of the cruise industry in the Black Sea region*. – Economics, education and real economy: development and interactions in the digital age, 2020. ISBN: 978-954-21-1038-5
9. MeinSchiff [<https://www.meinschiff.com/en>]
10. MSC Cruises  
[<https://www.msccruises.eu/easterneurope>]
11. NCL  
[<https://www.ncl.com/fr/en/?msockid=37dacf53837f6d9c2407dc3c82d56cc0>]
12. Travel Weekly  
[<https://www.travelweekly.com/>]

# Eco-Efficiency and Service Quality as Dual Drivers of Competitiveness in Liberalized Suburban Rail Transport

Kostadin Trifonov

Dept of Technology, Organization and Management of Transport, Todor Kableshkov University of Transport, Sofia, Bulgaria  
ktrifonov@vtu.bg | ORCID: 0000-0002-9130-483X

**Abstract:** The liberalisation of European passenger rail markets under the EU's Fourth Railway Package confronts suburban rail operators with a fundamentally new competitive environment. Where incumbents once operated under protected concessions, they now face the prospect of open-access competition and competitive tendering. This paper proposes a two-dimensional model of competitiveness centred on eco-efficiency and service quality — treated not as independent performance metrics, but as mutually reinforcing drivers of long-term market position. Eco-efficiency is defined as the ratio of transport output, measured in passenger-kilometres, to the energy and resource inputs required to achieve it, including CO<sub>2</sub> emissions. Service quality is assessed across five dimensions: reliability, passenger comfort, rolling-stock condition, accessibility, and the onboard environment. Drawing on European comparative practice and a focused analysis of the Plovdiv–Karlovo suburban corridor in Bulgaria, the paper demonstrates that these two dimensions operate in a relationship of synergy. Modern, energy-efficient rolling stock improves the passenger experience and raises load factors, which in turn yields further gains in eco-efficiency. The corridor analysis illustrates both the potential and the current constraints facing operators in a post-socialist railway context. An examination of existing Public Service Obligation (PSO) frameworks reveals a structural misalignment: current subsidy schemes are oriented predominantly toward maintaining geographic service coverage, rather than rewarding environmentally efficient and high-quality delivery. This creates an incentive structure that may discourage investment in precisely the capabilities that would enhance competitiveness under liberalisation. The paper concludes with targeted recommendations for reorienting performance indicators and funding mechanisms toward the proposed dual-driver model, with the aim of placing suburban rail development on a more sustainable and competitive footing.

**Keywords:** ECO-EFFICIENCY, SERVICE QUALITY, SUBURBAN RAIL, LIBERALIZATION, COMPETITIVENESS, PASSENGER COMFORT, PUBLIC SERVICE OBLIGATION, FOURTH RAILWAY PACKAGE, BULGARIA, SUSTAINABLE TRANSPORT

## 1. Introduction

The liberalization of European rail passenger markets, driven by successive EU Railway Packages and culminating in the Fourth Railway Package (2016/2018), has fundamentally altered the competitive dynamics of suburban rail transport [1, 2]. In open-access or tendered market environments, operators can no longer rely on exclusive franchises as protection against competition. They must actively differentiate their services to attract and retain passengers who face credible alternatives including private vehicles, bus services, and urban transit systems.

Previous research on suburban rail competitiveness has predominantly addressed service quality [3, 4] and environmental performance [5, 6] as largely independent dimensions. Fewer studies have examined their joint strategic role as mutually reinforcing drivers of competitive advantage. This gap is significant because the two dimensions are structurally linked: investment in modern rolling stock simultaneously improves passenger comfort and reduces energy consumption, creating compounding benefits for operators who pursue both objectives.

The EU Green Deal and the Fit for 55 legislative package [7] reinforce this linkage at the policy level, setting binding decarbonization targets for transport while the Fourth Railway Package opens markets to competition. Operators who align environmental performance with service excellence are therefore better positioned to meet both regulatory requirements and market expectations simultaneously. This dual alignment is the strategic core of the framework proposed in the present paper.

This paper proposes a dual-driver framework in which eco-efficiency and service quality together determine competitive positioning in liberalized suburban rail markets. The study extends the competitiveness research agenda by integrating environmental performance as a strategic variable alongside established service quality dimensions. The Bulgarian suburban rail market — characterized by aging rolling stock, partial liberalization, and public service obligation (PSO) contracts — provides the empirical context, with particular reference to the Plovdiv–Karlovo suburban corridor.

## 2. Theoretical Framework

### 2.1. Eco-Efficiency in Rail Transport

Eco-efficiency, originally defined by the World Business Council for Sustainable Development [8] as the delivery of competitively priced goods and services satisfying human needs while progressively reducing ecological impacts, has been widely applied to transport systems. In the rail context, eco-efficiency is expressed as the ratio of transport output to environmental input:

$$\text{Eco-efficiency} = \text{Transport output (pass.-km)} / \text{Environmental input (energy, CO}_2\text{)}$$

Higher values indicate more passenger-kilometres delivered per unit of environmental cost. Electric traction achieves significantly higher eco-efficiency than diesel, particularly on electrified suburban corridors with high load factors. Regenerative braking in modern electric multiple units (EMUs) further improves eco-efficiency by recovering kinetic energy during deceleration. For liberalized suburban rail markets, eco-efficiency has emerged as both a regulatory requirement — under EU Green Deal commitments — and a commercial asset, as sustainability increasingly influences passenger and government procurement decisions.

For operational assessment, eco-efficiency in suburban rail can be measured through four primary indicators: (i) specific energy consumption per passenger-kilometre (kWh/pass.-km); (ii) specific CO<sub>2</sub> emissions per passenger-kilometre (gCO<sub>2</sub>/pass.-km); (iii) rolling stock utilization rate, defined as the ratio of occupied seat-kilometres to total available seat-kilometres; and (iv) fleet energy intensity, reflecting average consumption per train-kilometre. Together these indicators form an eco-efficiency profile that allows cross-operator and cross-corridor benchmarking within a liberalized market framework [5, 6].

### 2.2. Service Quality as a Competitive Driver

Service quality in suburban rail encompasses reliability (punctuality, frequency), physical comfort (seating, cleanliness, temperature, space), accessibility, information provision, and safety. Research applying the Geometric Mean Fuzzy-AHP methodology has identified and ranked the relative importance of comfort indicators for suburban passengers, establishing that physical comfort and reliability are the dominant competitive dimensions [3, 4, 9].

In a liberalized market, service quality directly mediates modal choice. Passengers who perceive suburban rail as comfortable and reliable exhibit lower price sensitivity and greater loyalty, reducing revenue volatility in competitive environments. Conversely, poor service quality accelerates modal shift toward road transport, undermining the commercial case for rail and increasing subsidy burdens on public budgets [3, 10].

### 2.3. The Dual-Driver Model

The core contribution of this paper is a dual-driver competitive framework in which eco-efficiency (E) and service quality (Q) jointly determine competitive advantage (CA), expressed as  $CA = f(E, Q)$ . The model posits three interdependencies: (i) investment in modern rolling stock improves both E and Q simultaneously; (ii) higher Q drives higher passenger demand, improving load factors and thus E; (iii) environmental differentiation attracts sustainability-conscious passengers, creating a positive demand feedback loop.

This positive interdependence distinguishes the dual-driver model from frameworks treating eco-efficiency and service quality as trade-offs constrained by investment budgets. The model suggests that operators pursuing both objectives jointly outperform those specializing in either dimension alone, particularly as liberalization intensifies and regulatory frameworks increasingly reward environmental compliance alongside service excellence.

The dual-driver framework has direct implications for PSO contract design. Regulation (EC) 1370/2007 [11] governs public service obligation contracts for passenger rail in the EU, establishing the legal framework within which subsidy mechanisms and performance requirements are defined. Performance-based contracts incorporating both eco-efficiency metrics and service quality indicators align operator incentives with the model's predictions, while traditional train-kilometre contracts systematically undervalue both dimensions.

## 3. Analysis: Bulgarian Suburban Rail Market

### 3.1. Market Structure and Liberalization Status

Bulgaria's railway market remains predominantly operated by BDZ Passengers under PSO contracts governed by Regulation (EC) 1370/2007 [11], covering suburban, regional, and long-distance services. Infrastructure is managed by the National Railway Infrastructure Company (NRIC). The Fourth Railway Package transposition has progressed legislatively, but practical open-access competition in domestic passenger services remains limited, with 2026 marking the entry of the first private passenger operator — Ivkoni Express — on selected PSO lots.

Operational data from the Ministry of Transport, together with the published Draft Rules and Procedures for Awarding Public Service Obligations in Railway Transport [12], indicate that the prevailing contractual architecture provides only limited incentives for improvements in eco-efficiency or service quality beyond the prescribed minima. This is primarily because neither dimension is systematically monitored, quantified, nor linked to performance-based remuneration within the existing contractual framework.

The Bulgarian railway network spans approximately 4,025 km, of which about 3,001 km are electrified. Suburban services operate on several key corridors, with the Sofia metropolitan area and the Plovdiv region constituting the highest passenger demand zones. Total passenger volumes have declined over the past decade, a trend attributable to both rolling stock deterioration and the growing competitiveness of road alternatives, creating urgency for the strategic realignment proposed by the dual-driver model.

### 3.2. The Eco-Efficiency Gap

Bulgarian suburban rail faces a substantial eco-efficiency deficit. The active passenger fleet includes diesel multiple units (DMUs) and locomotive-hauled rolling stock with average fleet age exceeding 35 years. Specific energy consumption per passenger-

kilometre significantly exceeds EU peer benchmarks for comparable suburban operations. Low average load factors — estimated below 30% on many suburban services — further depress eco-efficiency ratios, as fixed traction energy costs are distributed over fewer passenger-kilometres.

Electrified corridors — including Sofia–Plovdiv and the Plovdiv–Karlovo suburban segment — offer structural eco-efficiency advantages through electric traction. Recent environmental assessment of the Sofia–Plovdiv modernisation programme [13] documents measurable reductions in traction energy use and CO<sub>2</sub> emissions per train-kilometre following infrastructure and rolling stock upgrades, providing empirical evidence that corridor modernisation delivers eco-efficiency gains consistent with the dual-driver model. A transition to modern EMUs on electrified suburban corridors is estimated to reduce specific energy consumption by 25–35% compared to current locomotive-hauled stock, based on comparable EU fleet renewal outcomes [5].

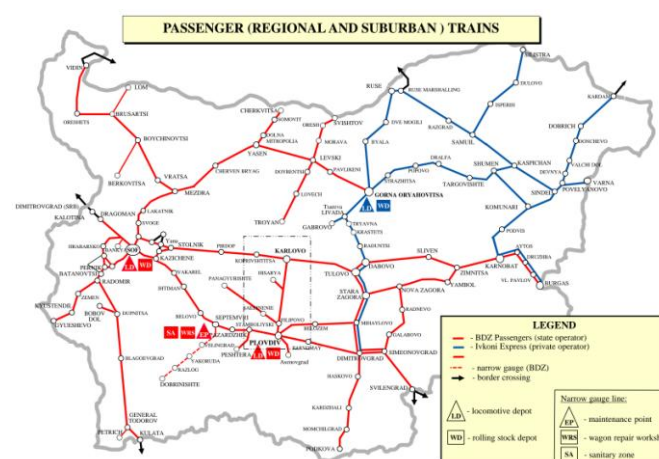


Fig. 1. Plovdiv–Karlovo suburban rail corridor, ~64 km, electrified 25 kV AC [12].

### 3.3. Service Quality Deficiencies

Applying established comfort indicator frameworks to Bulgarian suburban rail reveals poor performance on key passenger dimensions [14]: rolling stock condition, on-board cleanliness, temperature control, and accessibility for passengers with reduced mobility. Punctuality performance, while corridor-variable, generally underperforms EU norms for suburban services. Analysis of delays on the Bulgarian railway network [15] confirms that delay accumulation is concentrated on segments with legacy infrastructure and weak dispatcher automation, with mean delays on affected corridors exceeding EU suburban benchmarks by a factor of two or more.

These deficiencies directly reduce modal competitiveness against private vehicles and intercity bus services offering comparable journey times with superior comfort. The Logit mode-choice model [10] confirms that unreliable punctuality drives a systematic modal shift toward road transport, particularly among commuters and business travellers. Passenger surveys consistently identify rolling stock modernity and punctuality as the primary determinants of modal choice for suburban commuters [2, 3], reinforcing the strategic priority of service quality investment within the dual-driver framework.

## 4. Results and Discussion

Application of the dual-driver framework to the Bulgarian suburban rail context yields three principal findings, each with direct policy implications.

First, the eco-efficiency and service quality deficits share a common structural root: rolling stock aging. This creates a

concentrated strategic opportunity — a single major investment category (EMU fleet renewal) simultaneously addresses both competitive dimensions. Rolling stock modernization thus delivers higher combined competitive return than separate eco-efficiency and service quality improvement programs would achieve independently. Prioritizing fleet renewal on high-demand electrified corridors such as Sofia–Plovdiv maximizes the dual-driver return per unit of investment.

Second, current PSO contract design systematically misaligns incentives against the dual-driver model. Train-kilometre metrics reward service frequency regardless of occupancy (undermining eco-efficiency) and create no differential reward for comfort investment (weakening service quality incentives). Performance-based contracting incorporating eco-efficiency metrics (energy per pass.-km, CO<sub>2</sub> per pass.-km) and service quality indicators (comfort scores, punctuality rates) would directly incentivize dual-driver improvement. Such contracts are already standard practice in liberalized markets in Sweden, the United Kingdom, and the Netherlands, offering directly transferable design templates.

Third, liberalization creates a reputational first-mover advantage for operators achieving eco-efficient, high-quality service before open-access competition intensifies. Operators delaying investment risk competitive disadvantage when new market entrants introduce modern rolling stock with superior environmental and comfort profiles, as observed in liberalized Western European markets.

The findings collectively suggest that the dual-driver framework provides a superior analytical lens for suburban rail policy compared to single-dimension approaches focused exclusively on cost minimization or service standardization. Regulators, transport authorities, and operators who adopt the dual-driver perspective are better equipped to design contracts, allocate investments, and communicate competitive positioning as liberalization progresses.

**Table 1.** Dual-driver competitive indicators for the Plovdiv–Karlovo corridor.

| Performance Indicator                        | Current Status (BDZ) | Dual-Driver Target |
|----------------------------------------------|----------------------|--------------------|
| Spec. energy (kWh/pass.-km)                  | >0.25                | 0.10–0.15          |
| CO <sub>2</sub> (gCO <sub>2</sub> /pass.-km) | ~100                 | 20–40              |
| Load factor (%)                              | <30%                 | 45–60%             |
| Fleet age (years)                            | >35                  | <10 (EMU)          |
| Punctuality (%)                              | ~65%                 | >88%               |
| Comfort score (1–5)                          | ~2.1                 | ≥3.8               |
| Accessibility                                | Non-compliant        | TSI PRM            |

## 5. Conclusions

This paper has proposed and examined a dual-driver competitive framework positioning eco-efficiency and service quality as jointly determining competitive advantage in liberalized suburban rail transport. Applied to the Bulgarian suburban rail context, the framework reveals structural complementarity between the two dimensions and identifies rolling stock modernization as the highest-leverage lever for simultaneous improvement.

Four conclusions emerge: (1) eco-efficiency and service quality are mutually reinforcing strategic assets in liberalized suburban rail markets, not competing priorities constrained by shared investment budgets; (2) modern rolling stock investment represents the optimal intervention for dual-driver improvement given the shared structural root of current deficits; (3) Bulgarian PSO contract structures require reform to incorporate eco-efficiency and service quality performance metrics; (4) early movers in the dual-driver strategy will establish durable competitive positioning as market liberalization progresses under the Fourth Railway Package.

The paper acknowledges limitations: the analysis is primarily conceptual and qualitative, relying on available aggregate data for the Bulgarian market rather than operator-level primary data. The proposed eco-efficiency indicators have not been empirically validated against actual BDZ Passengers operational data, which constitutes a priority direction for follow-up research.

Future research should develop a quantitative measurement instrument for the dual-driver competitiveness index and test it empirically across multiple suburban rail markets in Central and Eastern Europe at different liberalization stages, enabling cross-country benchmarking and evidence-based policy recommendations for PSO contract reform.

## 6. References

- European Parliament and Council, “Directive 2016/2370/EU amending Directive 2012/34/EU as regards the opening of the market for domestic passenger transport services by rail,” Official Journal of the EU, L 352, 2016. <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2016/2370/oj/eng>
- S. Stoilova, Study of railway passenger transport in the EU, Tehn. Vjesnik, **25**, 587–595 (2018). <https://doi.org/10.17559/TV-20160926152630>
- E. Nathanail, Measuring the quality of service for passengers on the Hellenic railways, Transp. Res. Part A, **42**, 48–66 (2008). [https://www.researchgate.net/publication/23526774\\_Measuring\\_the\\_quality\\_of\\_service\\_for\\_passengers\\_on\\_the\\_Hellenic\\_railways](https://www.researchgate.net/publication/23526774_Measuring_the_quality_of_service_for_passengers_on_the_Hellenic_railways)
- L. Eboli, G. Mazzulla, SEM for analysing passengers’ perceptions about railway services, Procedia Soc. Behav. Sci., **54**, 96–106 (2012).
- M. Chester, A. Horvath, Life-cycle assessment of high-speed rail: California, Environ. Res. Lett., **5**(1), 014008 (2010).
- J. Åkerman, The role of high-speed rail in mitigating climate change, Transp. Res. Part D, **16**(3), 208–215 (2011).
- European Commission, Fit for 55: delivering the EU’s 2030 Climate Target on the way to climate neutrality, COM(2021) 550 final, Brussels (2021). Available at: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52021DC0550>
- WBCSD, Changing Course: A Global Business Perspective on Development and the Environment. MIT Press, Cambridge, 1992.
- T. Razmov, Yu. Varadinova, Analysis of the quality of the transport service, Mech. Transp. Commun., **11**, article 1150 (2013). <https://mtc-aj.com/article.1150.htm>
- M. Todorova, Choice of passenger transport mode using logit model, Proc. EURO–ZEL 2015, Žilina (Slovakia), 216–223 (2015).
- European Parliament and Council, “Regulation (EC) No 1370/2007 on public passenger transport services by rail and by road,” Official Journal of the EU, L 315, 2007, as amended by Regulation (EU) 2016/2338.
- Ministry of Transport and Communications (MTC), Draft Rules and Procedures for Awarding Public Service Obligations in Railway Transport, <https://www.mtc.government.bg/>
- S. Todorov, K. Kutsarova Dimitrova, Y. Paskalev, Environmental impact of modernisation of the Sofia–Plovdiv railway line, Proc. SGEM 2024, doi:10.5593/sgem2024/5.1/s23.95 (2024).
- Yu. Varadinova, S. Angelova, Analysis of market segments of passenger railway carriages, Mech. Transp. Commun., **19**(2), article 2180 (2021). <http://www.mtc-aj.com>
- K. Karagyozev, M. Todorova, Analysis of delays of freight and passenger trains on the railway network of Bulgaria, Sci. Forum Innov. Compet. Transp., Sofia, Bulgaria (2014).



# ПРЕДАВАНЕ НА ИНФОРМАЦИЯ ОТ ДЪННА СТАНЦИЯ ЗА ПОДВОДЕН МОНИТОРИНГ ДО ПЛАВАЩ РАДИОБУЙ ПО ХИДРОАКУСТИЧЕН КАНАЛ

## TRANSMISSION OF INFORMATION FROM A BOTTOM STATION FOR UNDERWATER MONITORING TO A FLOATING RADIOBUOY VIA A HYDROACOUSTIC CHANNEL

д-р инж. Коларов А. П., гл. асистент д-р инж. Найденов Р. В.,

Българска Академия на науките – Институт по металознание, съоръжения и технологии с Център по хидро- и аеродинамика „Академик Ангел Балеvски”<sup>1</sup>

aleksandar\_kolarov@abv.bg, radonaydenov@yahoo.de

**Abstract:** This article examines the process of transmitting information from a hydrophone of a bottom station for underwater monitoring to a floating radio buoy via a hydroacoustic channel. The features of the hydroacoustic communication environment, the requirements for the modems used, the factors affecting the reliability of the connection, as well as the possibilities for increasing the efficiency of information exchange at depths of up to 200 m are analyzed. The structural organization of the system is presented and the main technical solutions for implementing a stable data transmission channel in real operating conditions are considered.

**Keywords:** HYDROACOUSTIC MODEM, UNDERWATER MONITORING, HYDROPHONE, BOTTOM STATION, RADIO BEACON, UNDERWATER COMMUNICATION.

### 1. Увод

Развитието на съвременните системи за подводно наблюдение и контрол е тясно свързано с нарастващите изисквания към сигурността на морските акватории, защитата на критичната инфраструктура, екологичния мониторинг и управлението на морските ресурси. В последните години значително се увеличава използването на автономни подводни системи, хидроакустични сензорни мрежи и стационарни дънни станции за непрекъснато наблюдение на подводната среда. Основен елемент на тези системи са хидрофоните, които осигуряват регистриране на акустични сигнали от подводни обекти, плавателни съдове, подводни апарати и водолази.

Ефективността на подводния мониторинг зависи не само от качеството на регистрираните сигнали, но и от възможността събраната информация да бъде предадена своевременно до центровете за управление и анализ. Предаването на данни от дънна станция, разположена на значителна дълбочина, представлява сериозно техническо предизвикателство поради специфичните особености на водната среда. За разлика от наземните комуникации, използването на радиочестотни системи под вода е силно ограничено поради голямото затихване на електромагнитните вълни. Поради тази причина хидроакустичните комуникации се утвърждават като основен способ за обмен на информация в подводна среда.

Хидроакустичният канал се характеризира със сложни условия на разпространение на сигнала, включително многолъчево разпространение, отражения от водната повърхност и морското дъно, честотно зависимо затихване, шумове от природен и антропогенен произход, както и влияние на хидрологичните параметри на водната среда. Тези фактори оказват съществено въздействие върху качеството на комуникационната връзка и ограничават възможните скорости на предаване на информация. Въпреки това съвременните хидроакустични модеми предоставят възможност за изграждане на надеждни комуникационни линии на разстояния от стотици метри до десетки километри, което позволява реализацията на разпределени системи за подводен мониторинг.

Особен интерес представляват системите, при които дънната станция е свързана с плаващ радиобуй посредством хидроакустичен канал. В такава конфигурация радиобуйът изпълнява ролята на комуникационен шлюз между подводната и надводната среда. Информацията, получена от хидрофона и обработена в дънната станция, се предава чрез хидроакустичен модем към модем, монтиран на плаващия буй. След приемането на данните радиобуйът осъществява тяхното препредаване чрез радиоканал, клетъчна мрежа, сателитна връзка или друга комуникационна система към брегови център за наблюдение и

управление. Подобна архитектура позволява реализирането на автономни системи за продължителен мониторинг без необходимост от полагане на кабелна инфраструктура. Тя намира приложение при охрана на пристанища и военноморски бази, защита на подводни съоръжения, наблюдение на морската среда, контрол на корабоплаването, мониторинг на подводна шумова обстановка и откриване на неотризирана подводна дейност [1].

### 2. Предпоставки и начини за разрешаване на проблема

Работен колектив от Институт по металознание, съоръжения и технологии с Център по хидро- и аеродинамика разработи Многофункционалната дънна станция за подводен мониторинг /МДСПМ/, защитена като полезен модел със Свидетелство за регистрация рег. № 4987 U1, която изпълнява пълен набор от функционални възможности и осигурява ефективно измерване, записване, съхраняване и периодично предаване по радиоканал на набор от измервания, което позволява получаване, след обработка със специализиран софтуер, на цялостен и точен образ на термохалинната структура на морската среда в района на позициониране. МДСПМ притежава тактико-технически характеристики, които го правят универсален, мобилен и лесен за развързване на позиция и обслужване без необходимост от използване на водолази.



Фиг.1 Многофункционална дънна станция за подводен мониторинг

Многофункционалната дънна станция за подводен мониторинг притежава възможности за:

- адаптивно позициониране по дълбочина;
- непрекъснатост на процеса на измерване на хидрофизичните характеристики на морската вода;

- откриване, регистриране и запомняне на морски шумове, представляващи звукова аномалия, на фона на естествения шум на морето;
- бързо предаване на данни за откритата звукова аномалия и периодично предаване на хидрофизичните характеристики чрез изплаващ радиобуй.

МДСПМ е изключително подходяща за осъществяване на контрол на нивата на антропогенни шумове в морските пространства от оторизирани органи, както и за контрол на състоянието на крайбрежната инфраструктура и на корабоплаването във временно забранени за плаване и за риболовна дейност райони, поради това, че тя осигурява откриване на нарушенията на максимална дистанция с минимално закъснение и своевременно предаване на информация на оперативните централи.

Характерни технически решения на конструкцията, реализирани като предимства, са, че комуникацията между електронното оборудване в дънната станция и радиобуя се извършва по херметичен подводен кабел, навит на макара на намотки една върху друга, през херметичен въртящ преход [2]. Тези особености по време на експлоатацията на изделиято се оказаха икономически ефективни за дълбочини на позициониране до 50 м. Над тази дълбочина изискването за херметизиране на кабелния преход в тялото на радиобуя и във въртящия преход чувствително оскъпяват реализацията, а дебелината на херметичния кабел значително увеличава диаметъра на макаратата и съответно масогабаритните характеристики на станцията.

По тези причини за дълбочини до 200 м е целесъобразно комуникацията между дънната станция и радиобуя да се извършва по безжичен канал, а вместо подводен херметичен кабел да се използва стоманена проволка с подходящ диаметър.

### 3. Решение на проучения проблем

Предаването на информация от хидрофон на дънна станция към плаващ радиобуй посредством хидроакустичен канал представлява ефективно решение за изграждане на автономни системи за подводен мониторинг. Използването на хидроакустични модеми позволява създаването на гъвкава комуникационна архитектура без необходимост от кабелна инфраструктура. При правилен избор на работни честоти, модулация и комуникационни протоколи може да бъде осигурена надеждна връзка между подводната и надводната част на системата.

За обмен на информация между хидрофон, монтиран на дънна станция, и плаващ радиобуй чрез хидроакустични модеми, може да се използва следната архитектура - Фиг.2.:



Фиг.2 Архитектурa на системата

Информацията, регистрирана от хидрофона, се обработва в дънната станция и се преобразува в цифров вид. След това данните се предават чрез хидроакустичния модем към радиобуя. Получената информация се ретранслира към бреговия център посредством УКВ, LTE/5G или сателитна връзка.

Системата се състои от следните основни функционални блокове:

#### 1. Дънна станция

- Хидрофон за приемане на подводни акустични сигнали.
  - Аналого-цифров преобразувател (ADC).
  - DSP процесор за предварителна обработка:
    - филтрация;
    - спектрален анализ;
    - детекция на цели;
    - компресиране на данни.

• Хидроакустичен модем.

• Захранващ блок (батерии, акумулатори).

#### 2. Хидроакустичен канал

• Честотен диапазон: 10–50 kHz (за дистанции до няколко километра).

• Скорост на предаване:

- телеметрия: 100–1000 bit/s;
- аудио данни: до 10–20 kbit/s при благоприятни условия.

• Модулации:

- FSK;
- PSK;
- OFDM.

#### 3. Плаващ радиобуй

• Хидроакустичен модем за приемане на данни от дънната станция.

• Микроконтролер или индустриален компютър.

• Буферна памет.

• GPS приемник за синхронизация и позициониране.

• Радиомодул за връзка с брега.

• Слънчев панел и акумулатор.

#### 4. Брегови център

• Приемане и визуализация на данните.

• Архивиране.

• Анализ на подводната обстановка.

• Управление на мрежа от няколко дънни станции.

Потокът на информацията е:

- Хидрофонът регистрира подводен шум или сигнал.
- DSP модулът извършва обработка и извличане на признаци.
- Данните се пакетират.
- Хидроакустичният модем ги предава към буя.
- Буят приема пакетите и извършва проверка за грешки.
- Данните се препредават по радиоканал към бреговия център. При необходимост се изпращат команди обратно към дънната станция.

Хидроакустичният канал между дънната станция и плаващия радиобуй се характеризира с [3]:

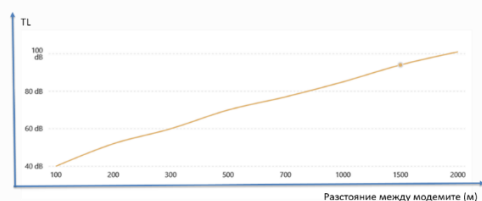
- ограничена честотна лента;
- значително затихване на сигнала;
- многолъчево разпространение;
- влияние на температурата, солеността и налягането;
- наличие на естествени и антропогенни шумове.

При дълбочини до 200 m най-често се използват честоти в диапазона от 10 до 50 kHz, които осигуряват компромис между скорост на предаване и обем на връзката.

Загубите в канала, основните компоненти на които са геометричното разпространение, поглъщането от водата, разсейването от повърхността и от дъното, могат да бъдат представени чрез формулата (1):

$$(1) \quad TL = 20\log R + \alpha R,$$

където TL (Transmission Loss) – Фиг. 3, са общите загуби при разпространение [dB], R е разстоянието между модемите [m],  $\alpha$  е коефициент на поглъщане.



Фиг. 3 Загуби при разпространение на хидроакустичен сигнал

Типични стойности на  $\alpha$  в зависимост от честотата са [4]:

- 10 kHz:  $\alpha \approx 1.1$  dB/km;
- 20 kHz:  $\alpha \approx 4.1$  dB/km;
- 30 kHz:  $\alpha \approx 8.3$  dB/km.

От графиката се вижда, че затихването на акустичния сигнал нараства нелинейно с увеличаване на честотата:

- до 10 kHz затихването е сравнително малко ( $< 1-2$  dB/km), което позволява комуникация на десетки километри;
- между 20 и 50 kHz загубите се увеличават значително (4–16 dB/km), което ограничава обхвата до няколко километра;
- над 100 kHz затихването става много голямо ( $> 30$  dB/km), поради което тези честоти са подходящи само за къси разстояния, но осигуряват по-висока скорост на предаване.

Таблица 1. Подводна комуникация при различни честоти

| Честота (kHz) | Затихване (dB/km) | Типично приложение                |
|---------------|-------------------|-----------------------------------|
| 1             | 0.06              | Далечна комуникация (>100 km)     |
| 5             | 0.3               | Десетки километри                 |
| 10            | 1.1               | До 10–20 km                       |
| 20            | 4                 | Няколко километра                 |
| 50            | 17                | 500–2000 m                        |
| 100           | 34                | До около 1 km                     |
| 200           | 70                | Стотици метри                     |
| 500           | 250               | Кратки разстояния (десетки метри) |

За подводни акустични модеми това означава, че изборът на работна честота е компромис между:

- голям обхват – използват се ниски честоти (5–15 kHz);
  - по-висока скорост на предаване – използват се по-високи честоти (30–100 kHz), но за значително по-къси разстояния – Таблица 1:
- Анализът показва, че:
- Ниски честоти (5–10 kHz) – осигуряват голям обхват, но скоростта на обмен е ниска (1–3 kbps).
  - Средни честоти (20–50 kHz) – най-често използваният диапазон за подводни модеми, тъй като предлага добър компромис между скорост и разстояние.
  - Високи честоти (100–500 kHz) – позволяват скорости от десетки до стотици kbps, но само на къси разстояния поради силното затихване.

Таблица 2. Влияние на честотата на скоростта на обмена на информация

| Честота (kHz) | Скорост на обмен (kbps) | Типичен обхват |
|---------------|-------------------------|----------------|
| 5             | 1                       | 10–50 km       |
| 10            | 3                       | 5–20 km        |
| 20            | 8                       | 2–10 km        |
| 30            | 15                      | 1–5 km         |
| 50            | 30                      | 0.5–2 km       |
| 100           | 80                      | 200–1000 m     |
| 200           | 180                     | 100–500 m      |
| 500           | 600                     | 20–100 m       |

Тази зависимост е една от основните причини системите за подводна комуникация да избират работната честота според конкретното приложение – далечна телеметрия, комуникация с автономни подводни апарати или високоскоростен обмен на данни на малки разстояния – Таблица 2 [5].

Когато подводната комуникация се използва за обмен на информация, получавана от хидрофон, необходимата скорост на обмен на информация зависи от това какво предава хидрофонът. Има три основни случая – Таблица 3:

Таблица 3. Зависимост между скоростта и съдържанието на предавания сигнал

| Предаван сигнал                                | Необходима скорост |
|------------------------------------------------|--------------------|
| Само измерени параметри (ниво, честота, време) | 100–1000 bit/s     |
| Компресиран аудио сигнал                       | 8–64 kbit/s        |
| Некомпресиран аудио сигнал                     | 128–768 kbit/s     |

Ако хидрофонът приема сигнали до 20 kHz, минималната честота на дискретизация трябва да бъде поне 40 kHz (съгласно теоремата на Найкуист), а необходимата скорост е  $\approx 640$  kbit/s за един канал. Това е прекалено висока скорост за повечето подводни акустични модеми, които обикновено осигуряват няколко kbit/s до няколко десетки kbit/s. Затова в практиката почти винаги се прилага:

- предварителна цифрова обработка;
- компресия;
- извличане на характеристики (feature extraction);
- предаване само на необходимата информация вместо на целия аудио поток.

За повишаване на надеждността на предаването се използват различни методи за цифрова модулация [6]:

- Frequency Shift Keying (FSK);
- Phase Shift Keying (PSK);
- Quadrature Phase Shift Keying (QPSK);
- Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM).

Допълнително се прилагат коригиращи кодове за откриване и поправяне на грешки, като Reed–Solomon и convolutional кодове. Това позволява намаляване на вероятността от загуба на информация при неблагоприятни условия.

За канал с честотна лента  $\approx 10$  kHz реалните скорости при различна модулация на сигнала са при FSK 0.3–2 kbps, при PSK 2–10 kbps, при OFDM 10–50 kbps.

За система за мониторинг е достатъчна скорост 2–10 kbps тъй като се предават:

- спектрални характеристики;
- нива на шум;
- тревожни съобщения;
- открити цели.

Типичните стойности на вероятността за грешка BER (Bit Error Rate) са от  $< 10^{-6}$  (отличен канал) до  $> 10^{-3}$  (лош канал)

За подобряване на BER се използват кодиране:

- FEC кодове;
- Reed–Solomon;
- Convolutional coding;
- LDPC кодиране.

#### 4. Резултати и дискусия

Дънната станция е оборудвана с хидрофон, предназначен за приемане на акустични сигнали от подводната среда. След предварително усилване и цифрова обработка на сигнала се извършва откриване на събития, класификация или извличане на характерни параметри на наблюдавания обект. Получената информация се преобразува в цифрово съобщение и се подава към хидроакустичен модем, изпълняващ функцията на подводен предавател. Хидроакустичният модем формира акустичен

сигнал, който се разпространява във водната среда до плаващ радиобуй. На борда на буя е разположен втори хидроакустичен модем, работещ в режим на приемане. След демодулация и декодиране на информацията данните се предават към комуникационния модул на буя и посредством радиоканал, клетъчна мрежа или сателитна връзка достигат до бреговия център за наблюдение. Така плаващият радиобуй изпълнява ролята на комуникационен шлюз между подводната хидроакустична система и надводната телекомуникационна инфраструктура. За система дънна станция – плаващ радиобуй на дълбочини до 200 m са подходящи хидроакустични модеми с работен обхват 500–5000 m, ниска консумация и възможност за автономна работа.

Основните показатели за ефективност на системата включват:

- Скорост на предаване на данни;
- Вероятност за грешка при предаване;
- Максимална комуникационна дистанция;
- Енергийна ефективност;
- Надеждност на връзката при различни хидрометеорологични условия.

Практически изследвания показват, че при използване на съвременни хидроакустични модеми могат да бъдат постигнати скорости от няколкокостотин бита до десетки килобита в секунда на разстояния от стотици метри до няколко километра.

За осигуряване на надеждна връзка между дънната станция и радиобуя хидроакустичните модеми трябва да притежават:

- работна дълбочина минимум 200 m;
- скорост на предаване от 1 до 20 kbps;
- адаптивна модулация;
- корекция на грешки (FEC);
- ниска консумация на енергия;
- възможност за мрежова работа и адресиране на възли.

Подходящи представители са модемите на производителите EvoLogics, Teledyne Benthos, Sonardyne и Subnero.

**Таблица 4. Основни характеристики на подходящи за използване в системата модеми**

| Производител     | Модел          | Честотен диапазон (kHz) | Максимален обхват (km) | Скорост на предаване (bit/s) | Консумация  |
|------------------|----------------|-------------------------|------------------------|------------------------------|-------------|
| EvoLogics        | S2C R 18/34    | 18–34                   | до 3.5                 | до 13 900                    | ниска       |
| EvoLogics        | S2C R 42/65    | 42–65                   | до 2                   | до 31 200                    | ниска       |
| Teledyne Benthos | ATM-900 Series | 9–14                    | до 10                  | до 2400                      | средна      |
| LinkQuest        | UWM3000        | 20–30                   | до 3                   | до 9600                      | ниска       |
| Subnero          | WNC-M25M       | 20–30                   | до 2                   | до 5000                      | много ниска |

Изследванията показват, че при дистанции до 1000–1500 m и дълбочини до 200 m могат да бъдат постигнати надеждни комуникации с вероятност за успешно приемане над 90 % при използване на съвременни хидроакустични модеми.

Изчислението на енергийния баланс и SNR за хидроакустична връзка между дънна станция и плаващ радиобуй при параметри:

- разстояние между станцията и буя: до 300 m;
- работна честота:  $f = 25$  kHz;
- излъчвателно ниво (Source Level, SL): 180 dB re 1  $\mu$ Pa @ 1 m;
- ниво на шумовия фон (Noise Level, NL): 50 dB re 1  $\mu$ Pa
- усилване на приемника (Directivity Index, DI): 0 dB;

- загуби от реализация и обработка: 5 dB,
- за плитководен район на Черно море дава следните резултати:

**Таблица 4. Енергиен баланс на комуникационния канал**

| Параметър                     | Стойност     |
|-------------------------------|--------------|
| Излъчвателно ниво SL          | 180 dB       |
| Загуби при разпространение TL | -66 dB       |
| Прието ниво RL                | 114 dB       |
| Шумов фон NL                  | 50 dB        |
| Реализационни загуби          | -5 dB        |
| Краен SNR                     | <b>59 dB</b> |

## 5. Заключение

Предаването на информация от хидрофон на дънна станция към плаващ радиобуй посредством хидроакустичен канал представлява ефективно решение за изграждане на автономни системи за подводен мониторинг. Използването на хидроакустични модеми позволява създаването на гъвкава комуникационна архитектура без необходимост от кабелна инфраструктура. При правилен избор на работни честоти, модулация и комуникационни протоколи може да бъде осигурена надеждна връзка между подводната и надводната част на системата. За система дънна станция – плаващ радиобуй в условията на Черно море, използваща честоти 20–30 kHz и излъчвателно ниво около 180 dB re 1  $\mu$ Pa @ 1 m, може да се осигури надеждна хидроакустична комуникация на разстояния от 1–2 km със запас по SNR над 40 dB. Тези стойности са достатъчни за предаване на телеметрична информация, данни от хидрофони и алармени съобщения от системи за подводен мониторинг.

## Благодарност

Този публикация е осъществена по проект G7475, финансиран от програмата на НАТО „Наука за мир и сигурност“. (This publication was carried out under project G7475, funded by the NATO Science for Peace and Security Programme).

## 6. Литература

1. M. Stojanovic, J. Catipovic and J. Proakis, “Adaptive multi-channel combining and equalization for underwater acoustic communications”, J. Acoust. Soc. Am., 94, (3), part 1, pp. 1621–1631;
2. L. Freitag, M. Johnson, M. Stojanovic, D. Nagle and J. Catipovic, “Survey and analysis of underwater acoustic channels for coherent communication in the medium-frequency band,” Proc. Oceans 2000, Providence, Sept. 2000.
3. M. Stojanovic, J. Catipovic, and J. Proakis, “Adaptive Multichannel Combining and Equalization for Underwater Acoustic Communications,” J. Acoust. Soc. America, vol. 94, no. 3, Sept. 1993, pp. 1621–31.
4. M. Chitre, “A High-Frequency Warm Shallow Water Acoustic Communications Channel Model and Measurements,” J. Acoust. Soc. America, vol. 122, no. 5, Nov. 2007, pp. 2580–86
5. D. Kilfoyle, J. Preisig, and A. Baggeroer, “Spatial Modulation Experiments in the Underwater Acoustic Channel,” IEEE J. Oceanic Eng., vol. 30, no. 2, Apr. 2005, pp. 406–15
6. E. Zorita and M. Stojanovic, Space–frequency block coding for underwater acoustic communications, IEEE J. Oceanic Eng., vol. 40: 303–314, April 2015.



# Изследване механизма на влияние на подводната комуникация с хидроакустични модеми върху работата на хидрофон при обмен на информацията от него

## Research into the mechanism of influence of underwater communication with hydroacoustic modems on the operation of a hydrophone during the exchange of information from it

Главен асистент д-р инж.Найденев Р. В., д-р инж. Коларов А. П

radonaydenov@yahoo.de, aleksandar\_kolarov@abv.bg

**Абстракт:** Настоящото изследване разглежда влиянието на обмена между хидроакустични модеми на добиваната по пасивен способ информация върху ефективността на работата на хидрофоните в подводна акустична среда. Анализирани са особеностите на предаването на данни чрез акустични сигнали във водна среда, където разпространението на звуковите вълни е съпроводено с шумове, отражения, затихване и интерференции. Основен акцент е поставен върху взаимодействието между сигналите, генерирани от хидроакустичните модеми, и приемните характеристики на хидрофоните, използвани в системите за подводен мониторинг

**KEYWORDS:** HYDROACOUSTIC MODEM, HYDROPHONE, UNDERWATER COMMUNICATION, ACOUSTIC NOISE, SNR

### 1. Увод

Подводният мониторинг намира широко приложение при екологични наблюдения, контрол на морската среда, мониторинг на подводна инфраструктура, океанографски изследвания и системи за сигурност. Основен проблем при тези приложения е предаването на събраните данни от подводните сензори към наземни потребители. Поради силното затихване на радиовълните във вода, най-разпространеният метод за подводна безжична комуникация е използването на акустични вълни. Хидроакустичните канали позволяват обмен на информация на значителни разстояния, макар и при ограничена пропускателна способност и наличие на специфични смущения като многолъчево разпространение, шум и доплерови измествания. Изследванията показват, че акустичната комуникация остава предпочитаното решение за подводни сензорни мрежи поради значително по-малкото затихване в сравнение с електромагнитните и оптичните методи.

Използването на хидроакустичен канал за предаване на информация от дънна станция към плаващ радиобуй представлява ефективно решение за изграждане на автономни системи за подводен мониторинг. Въпреки ограниченията на подводната акустична среда, съвременните методи за цифрова обработка на сигналите, адаптивна модулация и корекция на грешки позволяват реализиране на надеждни комуникационни връзки при различни морски условия. Разработването на подобни системи създава предпоставки за изграждане на мащабни подводни сензорни мрежи за научни, екологични и индустриални приложения [1].

Изследването на влиянието на обмена на информация между хидроакустични модеми върху работата на хидрофон е от съществено значение за оценка на качеството на измерванията и за определяне на възможните източници на смущения в подводната акустична среда. Анализът на параметри като Sound Pressure Level (SPL), шумово ниво, отношение сигнал/шум (SNR) и честотен спектър позволява да се оцени степента на въздействие на комуникационния процес върху измервателната система.

Оценката на влиянието на обмена на информация между хидроакустични модеми върху работата на хидрофон изисква анализ както на физичните акустични процеси, така и на характеристиките на сигналите и приемната апаратура.

### 2. Предпоставки и начини за разрешаване на проблема

Оценката на влиянието на обмена на информация между хидроакустични модеми върху работата на хидрофон изисква анализ както на физичните акустични процеси, така и на характеристиките на сигналите и приемната апаратура. Структурираната методика и основните фактори за изследване на основните механизми на влияние включват:

#### 2.1 Основни механизми на влияние:

- Акустично смущение (Acoustic Interference). Хидроакустичните модеми излъчват звукови сигнали в честотен диапазон обикновено между 5 kHz и 100 kHz (в зависимост от модела и приложението). Тези сигнали могат да:
  - повишат нивото на шума в работния диапазон на хидрофона;
  - намалят съотношението сигнал/шум (SNR);
  - причинят маскиране на слабите сигнали.
- Спектрално припокриване. Ако честотният диапазон на модема съвпада с чувствителния диапазон на хидрофона:
  - възниква директно спектрално припокриване
  - хидрофонът може да регистрира комуникационния сигнал като смущение

Пример: Модем работи на 20–30 kHz, хидрофон измерва шум в диапазона 10–40 kHz - налице е директно влияние.

- Нелинейни ефекти и насищане. При близко разположение:
  - възможно е насищане на предусилвателя;
  - възникват хармонични изкривявания;
  - може да се получи временно „заглушаване“ на приемника.
- Механично предаване на вибрации. Ако модемът и хидрофонът са монтирани на обща конструкция:
  - възможно е предаване на структурен шум;
  - влиянието не е само по воден път, а и по механичен

#### 2.2 Количествена оценка на влиянието:

- Анализ на нивото на звуковото налягане (SPL), Сравняват се:
  - ниво на сигнала от модема;
  - чувствителност на хидрофона (dB re 1V/μPa);
  - фонов шум.
- Оценка на SNR. Ако SNR спадне под:
  - 10 dB → значително влошаване;

- 3 dB → практически граница на детекция.
- Моделиране на разпространението. Използва се класическият модел - формула (1):

$$(1) \quad TL = 20\log R + \alpha R,$$

където  $TL$  (Transmission Loss) са общите загуби при разпространение [dB],  $R$  е разстоянието между модемите [m],  $\alpha$  е коефициент на поглъщане.

Така може да се определи безопасно разстояние между модем и хидрофон.

### 2.3 Експериментална методика:

- Измерване на базов шум (без комуникация)
- Активиране на модемите
- FFT спектрален анализ
- Измерване на:
  - RMS ниво;
  - пикови стойности;
  - хармонични изкривявания.
- Анализ във времева и честотна област.

### 2.4 Основни фактори, определящи степента на влияние:

- Разстояние между устройствата
- Работна честота
- Излъчвана мощност
  - Дълбочина и стратификация на водата
- Тип модулация (FSK, PSK, OFDM)
- Импулсен или непрекъснат режим

## 3. Резултати и дискусия

### 3.1 Цел на изследването

Настоящата работа има за цел да извърши оценка на влиянието на различни режими на обмен на информация между хидроакустични модеми върху работата на хидрофон, чрез провеждане на експериментални измервания във воден басейн при контролирани условия. Разгледани са режими без обмен на информация, предаване с ниска и висока скорост, както и непрекъснат обмен на данни, като е анализирано изменението на основните акустични параметри при всеки от тях [2].

### 3.2 Теоретична постановка на изследването

Хидроакустичните модеми използват звукови вълни за предаване на информация под вода. Основният параметър, характеризиращ качеството на приемане, е съотношението сигнал/шум – формула (2):

$$(2) \quad SNR = 10 \log_{10} \left( \frac{P_{\text{signal}}}{P_{\text{noise}}} \right)$$

където:  $P_{\text{signal}}$  е мощността на полезния сигнал;  $P_{\text{noise}}$  е мощността на шума.

При увеличаване на обмена на данни между модемите се очаква увеличение на акустичната енергия във водната среда, което може да доведе до намаляване на чувствителността на хидрофона.

### 3.3 Условия за провеждане на изследването

За провеждане на изследването е използвано следното оборудване:

-Хидроакустичен модем №1 и хидроакустичен модем №2 - EvoLogics S2C 15/27 с параметри- Честотен диапазон 15–27 kHz Максимална скорост на предаване до 9.2 kbit/s Работен обем до 6000 m

-Хидрофон - Neptune Sonar D/60 с параметри: Честота- 10–25 kHz, Чувствителност- 170 до -200 dB, Шум 40–60 dB, SNR 10–20 dB, Насоченост-Омни

-Осцилоскоп 100 MHz : Siglent SDS1104X-E – 4 канала, 1 GSa/s, много добро съотношение цена/възможности

-Анализатор на спектър FFT анализ : Stanford Research Systems SR760, DC – 100 kHz за Аудио, шум, вибрации

-Компютърна система със софтуер за анализ

Измерванията са проведени във воден басейн с използване на акустични модеми, работещи на честота 10–25 kHz. Разстоянието между хидрофона и модемите е 2 m, а температурата на водата по време на експеримента е 18 °C. Модемите са работили в режим half-duplex. По време на експериментите са регистрирани следните акустични параметри [3]:

- Ниво на звуково налягане (SPL);
- Ниво на фонов шум;
- Съотношение сигнал / шум (SNR);
- Честотен спектър на сигналите.

Проведени са измервания при следните режими на работа на модемите [4]:

- Липса на обмен на информация;
- Предаване с ниска скорост;
- Предаване с висока скорост;
- Непрекъснат обмен на данни.

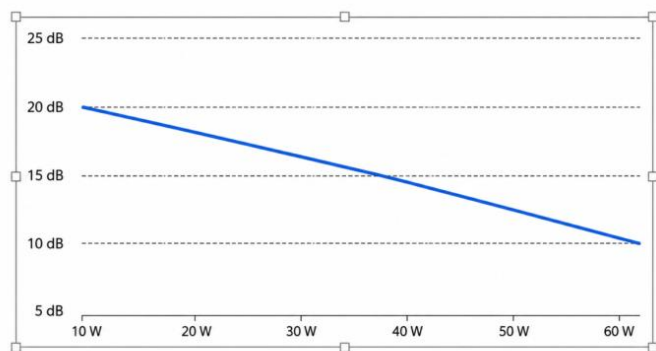
### 3.4 Анализ на резултатите

Резултатите от изследване са показани в следната таблица и графики – Таблица 1 [5]:

Таблица 1 Резултати от изследването

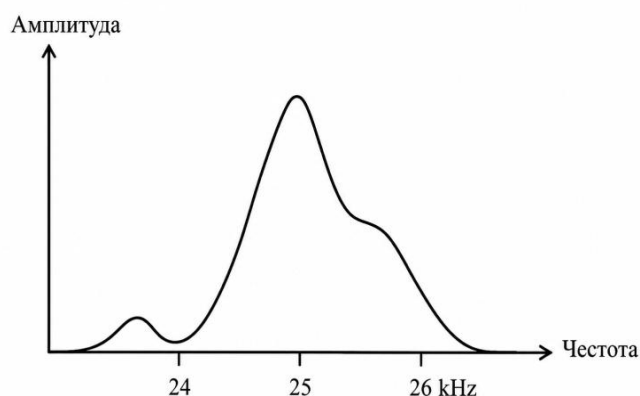
| Режим на работа             | Ниво на шум [dB] | Пиков сигнал при 25 kHz [dB] | SNR [dB] | Наблюдавани смущения             |
|-----------------------------|------------------|------------------------------|----------|----------------------------------|
| Без обмен на данни          | 42               | 44                           | 28       | Няма                             |
| Ниска скорост на предаване  | 58               | 67                           | 18       | Слаби импулсни смущения          |
| Висока скорост на предаване | 71               | 79                           | 11       | Силна интерференция              |
| Непрекъснат обмен           | 83               | 91                           | 5        | Насищане и спектрално разширение |

От представените резултати се вижда как влияе на мощността на модема върху SNR [Фиг. 1]. По-високата мощност на модема увеличава акустичния шум, вероятността от насищане на приемника и намаляване на чувствителността на хидрофона [6]. При мощности над 40 W често се наблюдава спад в качеството на приемания сигнал. При увеличаване на мощността на модема съотношението сигнал/шум на хидрофона намалява.



Фиг.1 Влияние на мощността върху SNR

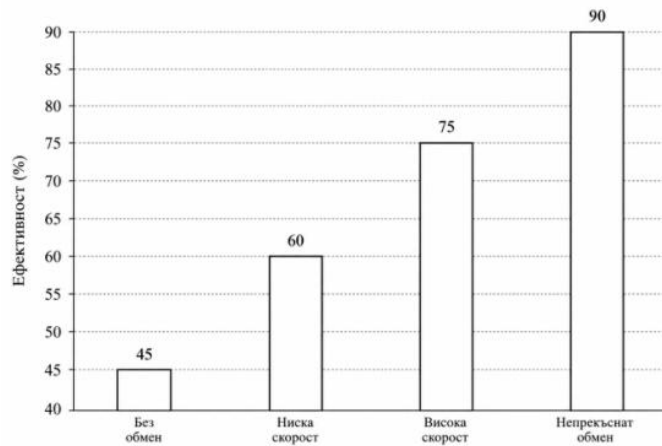
При отсъствие на комуникация шумовият фон остава нисък (Фиг. 2), спектърът е равномерен и липсват ясно изразени пикове около 25 kHz. Получените стойности показват нормална работа на хидрофона [7]. Наблюдаваните нива на шума се намират в очакваните граници за използваната измервателна среда. Това потвърждава, че системата не е подложена на значителни външни смущения или електромагнитни влияния. Липсата на отчетливи спектрални компоненти в разглеждания честотен диапазон е индикация за стабилна работа на измервателния тракт. Анализът на спектъра не показва признаци за резонансни явления или паразитни сигнали, които биха могли да повлияят на резултатите. Получените данни могат да бъдат използвани като референтно ниво при последващи измервания и сравнения.



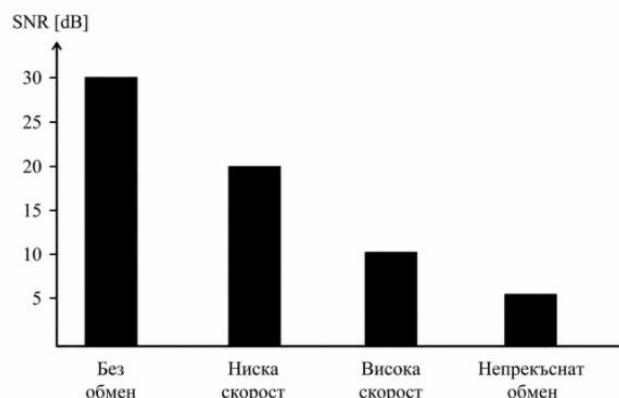
Фиг.2 FFT спектър около 25 kHz

При ниска скорост на предаване: се наблюдават кратки акустични импулси (Таб.1, Фиг. 3 и Фиг.4), нивото на шума се увеличава с около 16 dB и SNR намалява.

При висока скорост на предаване се увеличава използваната честотна лента (Таб.1, Фиг. 3 и Фиг.4), възниква значително спектрално разширение и се появяват се странични честотни компоненти. Наблюдава се сериозно влошаване на качеството на приемания сигнал.



Фиг.3 Ниво на шум при различни режими



Фиг.4 Отношение сигнал/шум (SNR)

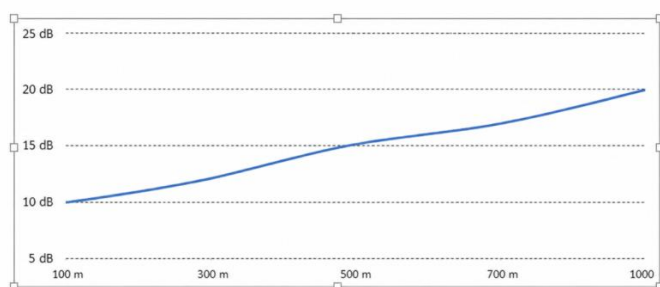
При висока скорост на предаване се увеличава използваната честотна лента (Таб.1, Фиг. 3 и Фиг.4), възниква значително спектрално разширение и се появяват се странични честотни компоненти. Наблюдава се сериозно влошаване на качеството на приемания сигнал.

При непрекъснат обмен на данни акустичното натоварване е максимално (Таб.1 и Фиг.4), хидрофонът работи близо до границата на насищане и се наблюдават силни паразитни хармоници. SNR намалява до критично ниски стойности.

С увеличаване на разстоянието между модема и хидрофона (Фиг.5) сигналът отслабва, шумът намалява и се подобрява се качеството на измерванията. SNR спрямо разстояние. Увеличаването на дистанцията между модема и хидрофона подобрява SNR.

### 3.5 Изводи от изследването

Хидроакустичните модеми оказват съществено влияние върху работата на близко разположен хидрофон. Най-критичен режим е непрекъснатият обмен на данни. Основният източник на смущения е работната честота 25 kHz и нейните хармоници. Увеличаването на скоростта на обмен води до: по-високо шумово ниво, по-нисък SNR, по-широк спектър на интерференция. За подобряване на работата е необходимо: честотно разделяне, екраниране, цифрова филтрация, и синхронизация на режимите на работа.



Фиг.5 Влияние на разстоянието върху SNR

#### 4. Заключение

Изследването показва, че обменът на информация между хидроакустични модеми оказва съществено влияние върху работата на хидрофоните. При увеличаване на интензивността на комуникацията се наблюдава повишаване на акустичния шум, намаляване на съотношението сигнал/шум и влошаване на качеството на приемане. Получените резултати могат да бъдат използвани при проектиране на подводни комуникационни системи с подобрена електромагнитна и акустична съвместимост.

От проведенния анализ могат да бъдат направени следните практически мерки за намаляване на влиянието на подводната комуникация при използването на хидроакустичен канал за предаване на информация от дънна станция към плаващ радиобуй

- Честотно разделяне (Frequency Planning)
- Времево разделяне (TDMA)
- Физическа дистанция
- Екраниране и виброизолация
- Цифрова филтрация
- Използване на насочени преобразуватели

#### Благодарност

Тази публикация е осъществена по проект G7475, финансиран от програмата на НАТО „Наука за мир и сигурност“. (This publication was carried out under project G7475, funded by the NATO Science for Peace and Security Programme).

#### 5. Литература

1. R. J. Urick, Principles of Underwater Sound, 2ed, McGraw-Hill, N. Y. 1975, pp 243-251.
2. M.Stojanovic Recent advances in high rate underwater acoustic communications,. IEEE J. Oceanic Eng., vol. 21: 125-136, 1996.
3. Computational Ocean Acoustics. Problems and Exercises. F. B. Jensen. W. A. Kuperman. M. B. Porter. H. Schmidt. February 26, 1996. Page 48
4. Underwater Acoustic Sensor Networks: Research Challenges May I. F. Akyildiz D. Pompili Rutgers, The State University of New Jersey
5. The state of the art in underwater acoustic telemetry DB Kilfoyle, AB Baggeroer IEEE Journal of oceanic engineering 25 (1), 4-27
6. Acoustic propagation considerations for underwater acoustic communications network development J. Preisi ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review, Volume 11, Issue 4 Pages 2 – 10
7. Fundamentals of Acoustical Oceanography H. Medwin, C. S. Clay Academic Press, 5.11.1997 - 712 Pages



# Измерване на подводен корабен шум в дълбоки води

## Measurement of underwater ship noise in deep water

Бистра Ненова

Институт по металознание, съоръжения и технологии с Център по хидроаеродинамика при Българска академия на науките,  
бул. Шипченски проход № 67, 1574 София, България  
bistraneno@hotmai.com

**Abstract:** Shipping is one of the major sources of anthropogenic underwater noise in the marine environment, posing a long-term ecological and technical challenge that requires accurate measurement and assessment. Design features of the vessels as well as variable operating parameters, such as speed, determine the characteristics of underwater noise from ships. Measurement accuracy and repeatability, on the other hand, depend significantly on the environmental conditions of the testing area. Due to the limited influence of seabed reflections, deep waters are usually preferred when high-quality measurements of underwater noise are needed. Although a single hydrophone may be used in certain measurement methodologies, standardized deep-water trials typically employ a three-hydrophone configuration. The application of standardized measurement and data-processing procedures aims to provide comparable and reproducible results for the evaluation of radiated noise from ships.

**Keywords:** UNDERWATER SHIP NOISE, DEEP WATER

### 1. Въведение

Развитието на корабоплаването през последните десетилетия е съпроводено както с увеличаване на броя на корабите за обслужване на разрастващата се световна търговия, така и с нарастване на размера на корабите, техните двигателни мощности и технологичната им сложност [1]. Тези процеси водят до значително увеличаване на подводното акустично излъчване, генерирано от търговското корабоплаване, което се определя като един от основните източници на антропогенен шум в световния океан. Спектърът на корабния шум се простира в широк честотен обхват - от няколко Hz до десетки kHz, като в нискочестотната област, приблизително от 10 Hz до 1000 Hz, търговските кораби допринасят съществено към формирането на околния подводен шум [2,3]. Основните шумови източници на корабите се припокриват с диапазоните на сензорно възприемане на звука от морски биологични видове, а акустичното маскиране компрометира способността за разпознаване на важни сигнали в същия честотен диапазон. Поради това в научната общност се наблюдава нарастваща загриженост относно въздействието на антропогенния шум от корабоплаването върху морската среда [4]. Акустичното замърсяване от подводния корабен шум се очертава като дългосрочен екологичен и технически проблем, изискващ прецизно измерване, мониторинг и оценка.

### 2. Източници и фактори, определящи излъчвания подводен корабен шум

Подводният шум, излъчван от корабите, се формира основно от три групи източници: шум от витлото, машинен шум и шум от потока около корпуса [5]. Витловият шум включва некавитационен и кавитационен компоненти и се характеризира с дискретни тонове на честотата на преминаване на лопатките и нейните хармоници, както и с широколентов високочестотен шум, свързан с кавитацията [6]. Машинният шум се генерира от главния двигател, задвижващите системи и спомагателното оборудване на борда и се предава към водата чрез вибрации на корпуса. Той има предимно тонален характер и е най-изразен в нискочестотния диапазон. Шумът от водния поток около корпуса и корпусните придатъци има широколентов характер.

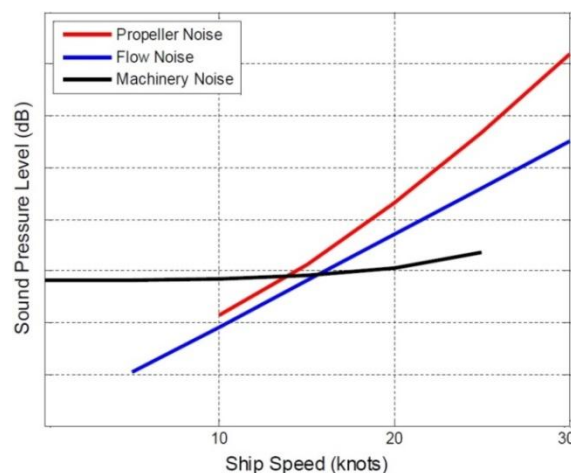
За конкретен плавателен съд характеристиките на произвеждания шум се определят от конструктивните особености на съда [7]. Към тях спадат типът и размерите на кораба, конструкцията на корпуса, типът на двигателя, видът на задвижващата система, геометрията на витлото, внедрените мерки за намаляване на шума и др. Например, при търговски кораби с електрическо задвижване се наблюдават по-ниски шумови нива. Съществено влияние върху генерирания подводен звук оказват и променливите експлоатационни

параметри, свързани с режима на работа и поддръжката на кораба. Сред тях са работните режими на двигателите, оборотите на витлото, конфигурацията на спомагателните механизми, дълбочината на потапяне и натоварването на съда, маневрените режими и др. Увредено или замърсено витло може да предизвика по-силна кавитация и съответно по-високи нива на шум. Скоростта на кораба е основен фактор, определящ относителния принос на отделните акустични източници и влияе пряко върху нивото на излъчвания подводен звук. При ниски скорости обикновено преобладава машинният шум. При увеличаване на скоростта над прага на възникване на кавитация шумът от витлото нараства значително и обикновено доминира при работната скорост на съдовете. На Фиг.1 е представена примерна илюстрация на изменението на подводния корабен шум от витлото, потока и машините в зависимост от скоростта на кораба [8 (адаптирано от 6)].

### 3. Измерване на корабен шум в дълбоки води

#### 3.1. Изисквания към района на измерване

Точността и повтаряемостта на измерванията на шума, излъчван от плавателни съдове, зависят в значителна степен от характеристиките на морската среда в района на изпитване. Освен параметрите на самия кораб, съществено влияние оказват дълбочината на водата, състоянието на морето, метеорологичните условия и нивото на фоновия шум [8, 9].



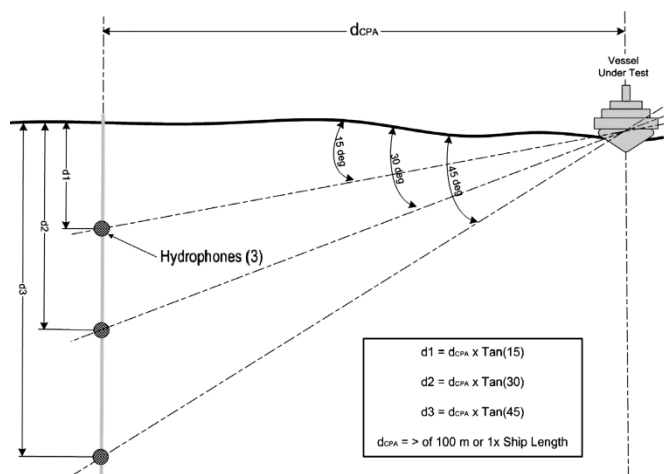
Фиг.1. Илюстрация на изменението на подводния корабен шум от различните източници в зависимост от скоростта на кораба: шум от витлото, шум от потока и шум от машините (ITTC 7.5-04-04-01 (2014) [8]).

При измервания на подводния корабен шум обикновено се предпочитат изпитвания в дълбоки води, тъй като при тях влиянието на отраженията от морското дъно върху разпространението на звука е ограничено в сравнение с плитководните райони. Това прави дълбоките води подходящи за измервания с високи изисквания към точността. Съгласно стандарта ISO 17208-1 [9] дълбоки води са тези с минимална дълбочина над 150 m или 1.5 пъти общата дължина на изпитвания кораб, в зависимост от това коя от двете стойности е по-голяма. Това изискване е възприето и от повечето класификационни организации. За измервания от най-висок клас (Grade A) ANSI/ASA S12.64 [11] препоръчва по-голяма минимална дълбочина - 300 m или три пъти дължината на кораба.

Въпреки че стандартът ISO 17208-1 не изисква конкретно географско местоположение за изпитванията, районът трябва да бъде избран така, че да осигурява благоприятни акустични и експлоатационни условия. При избора на локация се отчитат нивото на фоновия шум, корабният трафик, местните метеорологични условия и характеристиките на морската среда [15], както и възможностите за безопасно маневриране и общата безопасност на изпитването. Особено внимание се отделя на фоновия подводен шум, който определя долната граница на измеримите шумови нива. Той включва всички източници на шум, различни от изпитвания кораб, включително собствения шум на измервателната система [9, 10]. Към основните източници на фонов шум спадат корабният трафик, промишлените дейности, метеорологичните фактори, биологичният шум и геоложките процеси. Поради това изпитванията следва да се провеждат далеч от корабоплавателни маршрути, пристанищни подходи и райони с индустриални или строителни дейности, както и при отсъствие на валежи, които могат да повишат нивото на околния шум.

### 3.2. Конфигурация на измерването

Подводният шум, излъчван от плавателния съд, зависи от направлението на наблюдение спрямо корпуса, поради което при регистрирането му се използват различни конфигурации на разполагане на хидрофоните [8]. Разграничават се два основни вида измервания – странично измерване (beam aspect), при което хидрофоните са разположени откъм левия или десния борт на изпитвания кораб, перпендикулярно на диаметралната му равнина, и измерване под кила (keel aspect), при което хидрофоните се намират под траекторията на кораба [9]. В стандартите за измерване на подводен корабен шум най-често



Фиг.2. Конфигурация на хидрофоните при измервания на корабен шум с висока точност в дълбоки води съгласно стандарта ANSI/ASA S12.64-2009 [11, 12].

се използва страничното измерване.

Измерванията на подводния шум могат да бъдат извършвани както с единичен хидрофон, така и с множество хидрофони, формиращи хидрофонна редица. Макар че използването на единичен хидрофон е допустимо при определени методики и класове измервания, при стандартизирани изпитвания в дълбоки води обикновено се препоръчва конфигурация с няколко хидрофона.

Поради значителното влияние на границата въздух-вода върху разпространението на подводния звук, положението на хидрофоните спрямо морската повърхност е от съществено значение. Разполагането им във вертикална редица позволява да бъдат отчетени вариациите в загубите при разпространението на звука по различните акустични пътища между кораба и отделните хидрофони. Използването на три хидрофона се предпочита, тъй като намалява неопределеността на измерването и осигурява по-надеждна оценка на нивото на източника. Освен това осредняването на измерванията от трите хидрофона намалява влиянието на кохерентните ефекти, свързани с отражението от морската повърхност (ефект на огледало на Lloyd), а вертикалното им разположение позволява да се отчете и вертикалната насоченост на шумовото излъчване [10, 12].

С цел осигуряване на сравнимост на резултатите стандартът ISO 17208-1 използва конфигурация с три хидрофона, разположени така, че да измерват страничния шум на изпитвания кораб. Процедурата и геометрията на разполагане на хидрофоните са възприети от класове A и B на американския стандарт ANSI/ASA S12.64 [13]. При тази конфигурация трите хидрофона се разполагат вертикално на такива дълбочини, че в точката на най-близко приближаване на кораба (CPA) линията кораб-хидрофон да образува номинални ъгли 15°, 30° и 45° спрямо морската повърхност. Хоризонталното разстояние от кораба до хидрофонната редица в точката на най-близко приближаване се обозначава с  $d_{CPA}$  и се определя като по-голямата стойност между 100 m и една пълна дължина на кораба [9]. Препоръчителната геометрия на измерването е представена графично на Фиг.2 [11, 12].

По време на измерването изпитваният кораб се движи по права траектория покрай хидрофонната редица с предварително определена постоянна скорост. Преди началото на изпитването работните режими на машините трябва да са достигнали установено състояние и да останат непроменени до края на измерването. Траекторията на кораба се подбира така, че той да премине покрай хидрофонната редица на предварително определено разстояние, като в точката на най-близко приближаване (CPA) хоризонталното разстояние между акустичния център на кораба и хидрофонната редица е минимално. Данните от хидрофоните се регистрират непрекъснато по време на тестовото преминаване, като прозорецът за запис обхваща сектор  $\pm 30^\circ$  около точката на най-близко приближаване.

Тъй като корабът представлява насочен акустичен източник, за всяко изпитвано състояние се извършват по две преминавания както откъм десния, така и откъм левия борт. Това позволява усредняване на резултатите, оценка на евентуална асиметрия на шумовото излъчване между двата борда и определяне на насочеността му в хоризонталната равнина [8, 9, 12].

По време на изпитванията фоновият шум се измерва и отчита като неразделна част от процедурата. Измерванията се извършват в началото и в края на всеки период на изпитване, а при съществена промяна на метеорологичните условия или корабния трафик се повтарят. За определяне на нивото на фоновия шум се използва същата измервателна система, като изпитваният кораб се намира на разстояние най-малко 2 km от хидрофоните, за да не оказва влияние върху регистрираните

шумови нива. При необходимост се прилагат корекции за влиянието на фоновия шум върху резултатите от измерванията.

### 3.3. Измервателна система

За измерване на подводния шум се използват ненасочени пиезоелектрични хидрофони с висока чувствителност и широк честотен диапазон. Въпреки че повечето изследвания се провеждат при честоти под 20 kHz, при изискване за висока точност се препоръчва горната третинооктавна лента да е минимум 20 kHz или повече [9]. Измервателната система включва също предусилвател, апаратура за регистриране на акустичния сигнал и GPS за определяне на положението на кораба и хидрофоните по време на измерването.

В практиката се използват както стационарни, така и мобилни системи за измерване на подводния шум. Пример за мобилна измервателна система е използването на преносим хидроакустичен буй, който се разполага предварително на измервателната позиция, след което корабът извършва контролирано преминаване покрай него [6].

Измереното от хидрофона звуково налягане по време на изпитването се представя с величината ниво на звуковото налягане (SPL), изразена в децибели (dB) спрямо референтно налягане 1  $\mu\text{Pa}$ . Тази величина характеризира акустичното поле в точката на измерване и зависи както от шума, излъчван от кораба, така и от разстоянието до него и условията на разпространение на звука. Въз основа на нивото на звуковото налягане се определят величините ниво на излъчвания шум и ниво на източника.

Нивото на излъчвания шум (RNL, dB re 1  $\mu\text{Pa}\cdot\text{m}$ ) се получава чрез нормализиране на измереното ниво към референтно разстояние 1 m от кораба, като при дълбоки води се приема сферично разпространение на звука [9]. Нивото на източника (SL, dB re 1  $\mu\text{Pa}\cdot\text{m}$ ) представлява еквивалентното ниво на монополен източник в неограничена среда. То се определя чрез корекция на измереното ниво, отчитаща загубите при разпространението на звука, като по този начин се осигурява по-точна оценка на действителното шумово излъчване на кораба. При измервания в дълбоки води съгласно ISO 17208-2 [10] нивото на източника се получава чрез корекция на нивото на излъчвания шум, отчитаща ефекта на отражение от морската повърхност (огледало на Lloyd).

### 4. Заключение

Прецизното измерване на подводния корабен шум в дълбоки води има за цел получаване на сравними и възпроизводими резултати, които служат за оценка на акустичните характеристики на корабите. Получените резултати се използват при разработването на по-тихи плавателни съдове, за проверка на съответствието с изисквания на класификационни организации, както и за оценка на въздействието на корабоплаването върху морската среда. Развитието на стандартизирани методики за измерване и обработка на данните позволява надеждно сравнение на резултатите от различни изпитвания и проследяване на ефективността на мерките за намаляване на подводния шум.

### Благодарности

Тази публикация е осъществена по проект G7475, финансиран от програмата на НАТО „Наука за мир и сигурност“.

(This publication was carried out under project G7475, funded by the NATO Science for Peace and Security Programme.)

### Литература

1. M. F. McKenna et al., Underwater radiated noise from modern commercial ships, J. Acoust. Soc. Am., 131(1), 92-103, 2012.

2. H. Bretschneider et al., Specialist committee on hydrodynamic noise, Final report and recommendations to the 27th ITTC, 2014.

3. G. Wenz, Acoustic ambient noise in the ocean: spectra and sources, J. Acoust. Soc. Am., 34, 1936-1956, 1962.

4. MEPC.1/Circ.906/Rev.1 (Annex), Revised guidelines for the reduction of underwater radiated noise from shipping to address adverse impacts on marine life, IMO, 2024.

5. R. Urick, Principles of underwater sound, 2nd ed., McGraw-Hill, 1975.

6. J. Carlton, Marine Propellers and Propulsion (3rd ed.), Butterworth-Heinemann, ch.10, 2012.

7. T. Smith and J. Rigby, Underwater radiated noise from marine vessels: a review of noise reduction methods and technology, Ocean Engineering, 266(1), 112863, 2022.

8. ITTC 7.5-04-04-01 (Revision 03), Recommended procedures and guidelines: Underwater noise from ships, full-scale measurements, 2024.

9. ISO 17208-1: 2016, Underwater acoustics - Quantities and procedures for description and measurement of underwater sound from ships - Part 1: Requirements for precision measurements in deep water used for comparison purposes, 2016.

10. ISO 17208-2:2019, Underwater acoustics - Quantities and procedures for description and measurement of underwater sound from ships - Part 2: Determination of source levels from deep water measurements, 2019.

11. ANSI/ASA S12.64-2009/Part 1, Quantities and procedures for description and measurement of underwater sound from ships - Part 1: General requirements, 2009.

12. A. Badino et al., Normative framework for ship noise: present situation and future trends, Noise Control Eng. J., 60(6), 740-762, 2012.

13. C. Audoly, Standardization in underwater acoustics - current status and on-going actions, Proceedings of ACOUSTICS 2016, 2016.

14. E. Cruz et al., Study on inventory of existing policy, research and impacts of continuous underwater noise in Europe, EMSA report EMSA/NEG/21/2020, European Maritime Safety Agency, 2021.

15. А. Коларов и Р. Найденов, Един подход за реализиране на многофункционална дънна станция за подводен мониторинг, XII Международна научна конференция „Техника. Технологии. Образование. Сигурност“, 25-28, 2024.

# ЗАГЛУШАВАНЕ НА ПОДВОДНИ АКУСТИЧНИ КОМУНИКАЦИИ

Иванов И., Колев Ст., Лолов М.  
ИМСТЦХА-БАН, София, България

## JAMING OF UNDERWATER ACOUSTIC COMMUNICATIONS

Ivanov I., Kolev St., Lolov M..

Institute of Metal Science Equipment and Technologies with Hydroaerodynamics Centre "Acad. A Balevski" - BAS, Sofia, Bulgaria <sup>1</sup>

E-mail: ivo1942@abv.bg, s\_kolev@abv.bg, [martinlolov@gmail.com](mailto:martinlolov@gmail.com)

**Abstract:** This report presents the design and operation of an underwater acoustic communications jammer in the frequency range  $20\text{kHz} \div 45\text{kHz}$ . The experimental setup in the Tsonevo dam is described. The results obtained provide evidence that this jammer can effectively jam underwater acoustic communications in the frequency range  $20\text{kHz} \div 45\text{kHz}$ .

**KEYWORDS:** JAMMER, UNDERWATER ACOUSTIC COMMUNICATIONS

### Введение

Подводната акустична комуникация използва звукови вълни за предаване на данни между устройства, потопени във вода. За разлика от радиовълните, които не се разпространяват добре през водата, акустичните сигнали са много ефективни за подводна комуникация. Тези системи са от решаващо значение за задачи като дистанционно управлявани плователни средства, предаване на данни от сензори и комуникация между водолази и екипи на повърхността.

Сигурността на пристанища и елементи от критичната крайбрежна инфраструктура се постига чрез дейности, които затрудняват или спират работата на подводни нарушители (водолази и дистанционно управляеми обекти). Това се реализира чрез въздействие върху подводните акустични комуникации между последните.

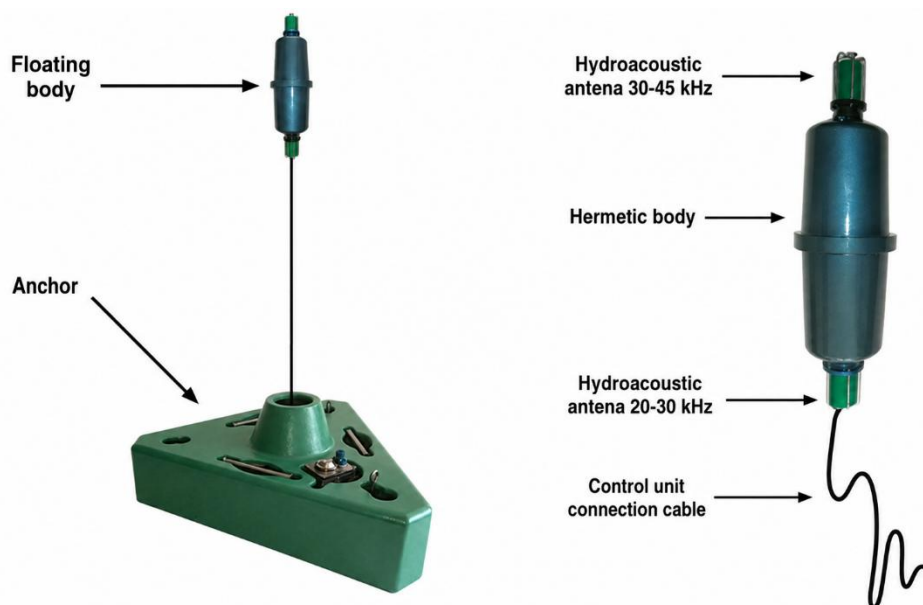
Ефективно заглушаване на подводни акустични комуникации се постига чрез излъчването на импулсни сигнали с честота, близка до тази на комуникациите, и амплитуда, достатъчна за нарушаването на разбираемостта на предаваната информация.

### Изложение

Разработена е и експериментиран смутител на подводни акустични комуникации. Той се позиционира на морското дъно на дълбочини до 40m. Осигурява регистриране работата на средства за подводна акустична

комуникация в два основни честотни диапазона:  $20\text{kHz} \div 30\text{kHz}$  и  $30\text{kHz} \div 45\text{kHz}$  самостоятелно, с помощта на оператор или по информация от външни източници. Ефективното заглушаване на подводните комуникации се постига посредством излъчването на импулсни сигнали с честота, близка до тази на комуникационните сигнали. Предавателят на смутителя се включва за определен период от време ( $3 \div 5$  минути) в псевдо непрекъснато излъчване на набор от кратки импулси с акустическа мощност не по-малка от  $3000\text{ Pa/m}$  ( $190\text{ dB re } 1\mu\text{Pa at } 1\text{m}$ ), които са запълнени с произволна (случайна) честота от спектъра на изборния честотен (под)диапазон.

Базовата конфигурация на смутителя на подводни акустични комуникации включва: хидроакустични антени, приемник, предаватели и команден блок, който е изпълнен във вид на едноплатков микропроцесорен контролер. Физически смутителят се състои от котва и изплаващо тяло, което се намира на разстояние  $2 \div 2.5\text{ m}$  от котвата и е съединено с нея посредством кабел (Фиг. 1). В котвата са монтирани в херметични кутии батерия за захранване от  $24\text{V}/26\text{Ah}$ , мощните хидроакустични предаватели и хардуерна инсталация. В тялото на изплаващото тяло са монтирани хидроакустичните антени и приемниците на хидроакустични сигнали с усилватели. В зависимост от варианта на изпълнение на смутителя към базовата конфигурация се прибавят или изваждат съставни функционални елементи [1].

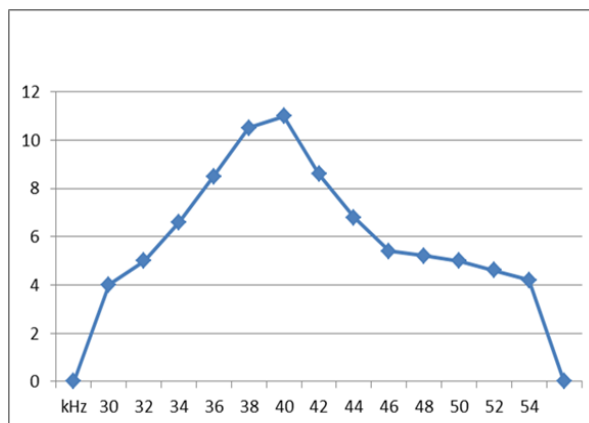
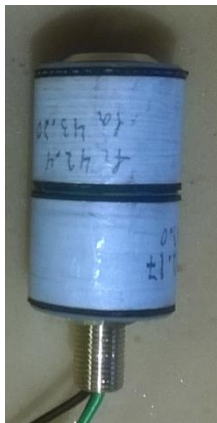


Фиг.1. Външен вид на смутителя

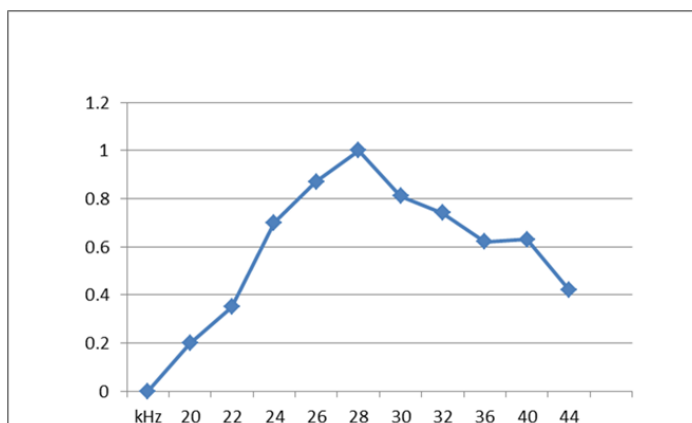
На изплаващото тяло са монтирани хидроакустичните антени. Горната антена се използва като приемна за диапазона  $20\text{kHz} \div 45\text{kHz}$  и като излъчваща за диапазона  $30\text{kHz} \div 45\text{kHz}$ . Долната антена се използва като излъчваща за диапазона  $20\text{kHz} \div 30\text{kHz}$ .

Корпусът на изплаващото тяло представлява херметизиран двуделен метален съд с подходящ обем и форма и положителна плавучест

На фигура 2 е показана хидроакустичната антена с двойната функция като приемна за диапазона  $20\text{kHz} \div 45\text{kHz}$  и като излъчваща за диапазона  $30\text{kHz} \div 45\text{kHz}$ . Тя е реализирана на базата на два цилиндрични пиезокерамични елемента с външен диаметър  $28\text{mm}$ , вътрешен диаметър  $22\text{mm}$  и височина  $20\text{mm}$ . Резонансната честота на антената е на  $40\text{kHz}$ . На тази честота ефективността ѝ в режим на излъчване е  $40\text{Pa/V/m}$  а чувствителността в режим на приемане  $150\mu\text{V/Pa}$ .



Фиг.2. Хидроакустична антена с двойно предназначение, вляво преди херметизация, в центъра херметизирана и в дясно честотната и характеристика



Фиг.3. Хидроакустична антена за диапазона  $20\text{kHz} \div 30\text{kHz}$ , вляво преди херметизация, в центъра херметизирана и в дясно честотната и характеристика

На фигура 3 е показана хидроакустичната антена предназначена за излъчване на сигнали в за диапазона  $20\text{kHz} \div 30\text{kHz}$ . Тя е реализирана на базата на два цилиндрични пиезокерамични елемента с външен диаметър  $42\text{mm}$ , вътрешен диаметър  $36\text{mm}$  и височина единия  $20\text{mm}$  а другия  $30\text{mm}$ . Резонансната честота на антената е на  $40\text{kHz}$ . На тази честота ефективността ѝ в режим на излъчване е  $35\text{Pa/V/m}$ .



Фиг.4. Блоково функционална схема на смутителя



След заставане на смутителя на позиция в съответствие с заложения алгоритъм на работа започва да работи в режим приемане на сигнали от хидроакустичната антена, която е предвидено да работи и в режим на излъчване (АА-1).

Софтуерно е заложена определена последователност за получаване на данни, тяхната обработка, избор на честотния под диапазон и време за активната работа на излъчвателя.

При приемане на сигнали с амплитуди над  $2 \div 10 \text{ Pa}$  в честотния диапазон  $20 \text{ kHz} \div 45 \text{ kHz}$  контролерът извършва амплитудно-честотен анализ на сигналите с цел определяне честотата на регистрираната комуникация.

След определяне на честотен диапазон на комуникацията се включва един от излъчвателите (АА-1 или АА-2) в съответния честотен под диапазон на работа за период от 3 до 5 минути.

В акваторията на язовир Цонево около преливника му в район с дълбочини от 2 до 20 са проведени експерименти за определяне на ефективността на разглеждания смутител за заглушаване комуникацията между два командни поста на апаратура за подводна звукова връзка „Спектър“ [2]. Тази апаратура използва горната странична лента при предаване на говор с носеща честота  $27 \text{ kHz}$ . Смутителят и приемно предавателните постове на апаратурата са разположени по „върховете“ на равностраничен триъгълник със страна около 500m.

Анализът на получените резултати показва, че след втората най-късно след третата дума от излъченото гласово съобщение смутителят започва да излъчва и операторите на

апаратурата „Спектър“ започват да чуват само прашене (бръм).

Смутителят е в процес на модернизация. Тя се изразява с разширяване на честотния диапазон на заглушаване към ниските честоти. Включен е под диапазон  $10 \text{ kHz} \div 20 \text{ kHz}$ . Излъчващата антена за този диапазон е конструирана на база на два цилиндрични пиезокерамични цилиндъра с външен диаметър 71mm, вътрешен 60mm и височина 45mm. Резонансната честота на тази антена е  $16,5 \text{ kHz}$ .

#### **Заклучение**

Представеният смутител на подводни акустични комуникации може да бъде използван за ефективно заглушаване подводни акустични комуникации в честотния диапазон  $20 \text{ kHz} \div 45 \text{ kHz}$  при защита на критичната крайбрежна инфраструктура при борбата с подводни нарушители.

#### **Благодарности:**

Дейностите извършени по този доклад са подкрепени от проект G7475 „ENHANCED NAVAL PORT FACILITY SECURITY CAPABILITIES“ (ENAPOFASEC).

#### **Литература:**

1. Патент **67446 B1**, Воденичаров Ст., Колев Ст., Коларов А. и др., Система за заглушаване на подводни комуникации, Патентно ведомство България, 2022г.
2. Б. Боянов, Апаратура за подводна звукова връзка „Спектър“, Техническо описание, Технически университет, Варна, 2012г.

# Разработване на микрофонен масив за наблюдение и откриване на източници на акустични сигнали

доц. д-р инж. Нестеров К. Н.<sup>1</sup> д-р инж. Пехливански В. И.<sup>1</sup> инж. Лясков Н.Г.<sup>1</sup>, инж. Пенев Н.П.<sup>1</sup>  
Българска Академия на науките – Институт по металознание, съоръжения и технологии с Център по хидро- и аеродинамика  
„Академик Ангел Балеvски”<sup>1</sup>

## Development of a microphone array for monitoring and detecting sources of acoustic signals

assoc. prof. Nesterov K.N. PhD<sup>1</sup>, Pehlivaniski V.I. PhD<sup>1</sup>, Liaskov N.G.<sup>1</sup>, Penev N.P.<sup>1</sup>  
Institute of Metal Science, equipment and technologies with Center for Hydro- and Aerodynamics “Acad. A. Balevski”  
Bulgarian Academy of Science, Sofia, Bulgaria<sup>1</sup>  
k.nesterov66@gmail.com, venpeh@abv.bg, nglyas@abv.bg, penata54@gmail.com

**Abstract:** The article proposes an approach for implementing a microphone array whose elements are part of a passive monitoring system. Methods for processing acoustic signals and an example hardware architecture for the array are presented.

**Keywords:** microphone array, passive monitoring system, acoustic signals

### 1. Въведение

Микрофонните масиви се утвърдиха като ключова технология за пасивно наблюдение, позволявайки точно откриване, локализиране и проследяване на акустични източници в реално време. Тяхното разработване изисква интегриран подход, обхващащ избора на подходяща геометрия на масива, хардуерна реализация и внедряване на съвременни алгоритми за обработка на сигнали [1,2,3].

В изследването ще бъдат разгледани 2 случая: използване на микрофонни масиви в честотният диапазон **0.5–20 Hz** и разстоянието за откриване до **2 km** и в честотният диапазон **16–20000 Hz** и разстояние **2 km**.

### 2. Резултати и дискусия

Основните аспекти, които трябва да се вземат предвид при разработването на такава система [1-5] са следните:

**1. Проектиране на масива:** Избор на геометрия (линеен, спираловиден, сферичен, тримерен) и брой микрофони според честотния обхват и разделителната способност. Компромис между разделителна способност и честотен обхват (напр. за честоти под 600 Hz са нужни специални решения).

#### 2. Методи за обработка на сигнали:

-Класически: Забавяне и сумиране (Delay-and-sum), TDOA/GCC-PHAT, MUSIC, ESPRIT.

-Съвременни: Усъвършенствани методи като претеглено формиране на лъча (Weighted beamforming), обобщен SRP метод (Generalized SRP), отчитащ сложна акустична среда, затворени оценители (closed-form estimators) за сферични масиви, устойчиви на смущения, и наказателно формиране на лъча (Penalized beamforming) за по-висока разделителна способност.

-Deep Learning подходи: Използване на невронни мрежи (CNN, MobileViT) за директна класификация на посоката на източника (DoA), особено при малък брой микрофони и в реверберационна среда.

**3. Хардуерно внедряване:** Избор на подходящи микрофони, интерфейси за събиране на данни и вградени системи за обработка (напр. FPGA) за локална обработка и безжично предаване на данни.

Може да се направи следното сравнение на ключови технологии за изграждане на микрофонни масиви (Таблица 1)

Таблица 1

| Технология / Метод                             | Принцип на действие                                                                              | Предимства                                                                                   | Недостатъци / Ограничения                                                                      |
|------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Линеен масив (4 микрофона)                     | Измерване на разликите във времето на пристигане (Time delays) по права линия.                   | Рентабилен, лесен за изграждане, подходящ за образователни и прототипни цели.                | По-ниска разделителна способност в 2D/3D пространство, чувствителен към посоката на източника. |
| Спираловиден/Плосък масив (напр. 56 микрофона) | Формиране на лъч (Beamforming) в 2D равнина, създаване на акустична картина.                     | Висока разделителна способност, визуализация на източниците в реално време.                  | Ограничен честотен обхват (обикновено >600 Hz), сложен и скъп хардуер.                         |
| Тримерен масив (3D/Octagonal, 23 микрофона)    | Комбинация от забавяне и претеглено сумиране (Weighted beamforming) за определяне на 3D позиция. | Възможност за локализиране на отдалечени източници (от 20 Hz до 1 MHz), висока точност.      | Сложна математическа обработка, по-скъпи микрофони и изчислителна платформа.                   |
| Сферичен масив                                 | Анализ на звуковото поле чрез сферични хармоници, използване на затворени формули за оценка.     | Устойчив към смущения и шум, висока изчислителна ефективност (без търсене в пространството). |                                                                                                |
| Малък масив (3 елемента) с Deep Learning       | Използване на невронна мрежа (RepMobileViT) върху спектрограми на звуковия интензитет.           | Отлична работа в реверберационна среда, малък размер, бърза обработка.                       | Изисква предварително обучение с данни, ограничен до предварително дефинирани зони (класове).  |

Стъпките за разработване на системата би следвало да са в следната последователност:

1. Дефиниране на изискванията: Първата стъпка е да се определят конкретните нужди от наблюдение. Какъв честотен обхват трябва да покрива системата (напр. 600 Hz - 20 kHz)? Какъв е максималният обхват на откриване (няколко метра или

стотици метри)? В каква среда ще работи (закрито/открито, шумна/тиха)? Тези параметри ще диктуват избора на геометрия и брой микрофони.

2. Избор на хардуерна платформа: Въз основа на изискванията се избира типът микрофон (електретен, MEMS), честотна характеристика и чувствителност. Избира се и система за придобиване на данни (DAQ) – от преносими USB интерфейси до мощни вградени системи като FPGA за самостоятелна работа.

3. Разработване на алгоритми за обработка: Това е основата на системата. За прости приложения може да се започне с класическия метод на забавяне и сумиране (Delay-and-Sum). За по-висока точност и устойчивост на шум и смущения се преминава към по-сложни методи като SRP-PHAT, MUSIC или съвременни алгоритми като подобрено претеглено изследване.

4. Формиране на лъча. В силно реверберационна среда или при ограничен брой микрофони, подходите със задълбочено обучение (deep learning) показват отлични резултати.

5. Интеграция и тестване: След като хардуерът и софтуерът са готови, се преминава към интеграция на системата. Провеждат се експериментални тестове за оценка на ъгловата разделителна способност, чувствителността към външен шум и способността за фокусиране върху конкретни посоки.

#### Потенциални приложения за наблюдение

Микрофонните масиви предлагат широка гама от приложения в сферата на сигурността и мониторинга [6-12]:

- **Системи за видеонаблюдение:** Насочване на камери към източник на звук (например счупено стъкло, изстрел, писък) и маркиране на критични моменти в записите.
- **Охрана на периметър и обекти:** Откриване и локализиране на нарушители в забранени зони, охрана на сгради чрез разпознаване на опити за взлом.
- **Наблюдение на защитени територии:** Проследяване на браконieri или нелегални превозни средства в национални паркове.
- **Търсене и спасяване:** Монтиране на безпилотни летателни апарати (дронове) или роботи за локализиране на оцелели в бедствени ситуации.
- **Мониторинг на промишлено оборудване:** Ранно откриване на неизправности в машини чрез анализ на акустични сигнали, като например откриване на течове на газ под високо налягане.

Разработването на ефективен микрофонен масив за наблюдение е интердисциплинарна задача, която съчетава познания по акустика, цифрова обработка на сигнали, електроника и машинно самообучение. Изборът на конкретни технологии и методи трябва да бъде воден от специфичните изисквания на приложението и средата на експлоатация.

Важно е да се знае, че използване на микрофонни масиви в честотният диапазон **0.5–20 Hz** и разстоянието за откриване до **2 km** поставят проекта в областта на **инфразвуковото наблюдение**, което е коренно различно от конвенционалните микрофонни масиви за звукови честоти (над 100 Hz). Това изисква специфичен подход, тъй като става дума за изключително дълги вълни.

Основните предизвикателства и конкретни насоки за разработване на такава система са както следва:

1. **Изключително дълги вълни:** При честота 0.5 Hz, дължината на вълната  $\lambda$  е около 680 метра (при скорост на звука 340 m/s). За 20 Hz,  $\lambda$  е 17 метра.

2. **Огромни размери на масива:** За да се постигне насоченост (beamforming) при тези дължини на вълната, масивът трябва да е със сравними размери. Минималният диаметър на масива трябва да е съпоставим с дължината на вълната, за да има смислена разделителна способност. Това означава, че за долния край на спектъра (0.5 Hz) би бил необходим масив с диаметър от порядъка на стотици метри.

3. **Физическа реализация:** На практика се използват два подхода за справяне с този проблем:

-**Геодезически разпределени сензори:** Използване на няколко отделни станции, разположени на километри една от друга.

-**Измерване на градиент на налягането:** Използване на специални инфразвукови микрофони (микробарометри), които измерват не само звуковото налягане, но и флуктуациите на вятъра (които са основният източник на шум).

#### Препоръчителна архитектура на системата

Предвид посочените параметри, системата не може да бъде класически микрофонен масив в преносим формат. Тя трябва да бъде проектирана като **разпределена сензорна мрежа** [13,14]. Препоръките са показани в Таблица 2.

Таблица 2

| Компонент                 | Препоръка                               | Обосновка                                                                                                                                                                                                                     |
|---------------------------|-----------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Тип сензор                | Инфразвукови микрофони (микробарометри) | Стандартните микрофони нямат чувствителност в този честотен диапазон. Инфразвуковите сензори са проектирани да улавят нискочестотни флуктуации на налягането и често включват системи за потискане на шума от вятър (пориви). |
| Геометрия на разположение | Геометрия на разположение               | Вместо един голям масив, се използват няколко отделни станции (възли), разположени на разстояние от 500 м до няколко километра една от друга. Това създава "виртуален масив" с огромна база (голям диаметър).                 |
| Брой сензори (станции)    | Минимум 4-5 станции                     | За еднозначно триангулиране на източник в 2D пространство са нужни поне 3 станции, но за по-голяма точност и устойчивост на шум се                                                                                            |

|                      |                                            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|----------------------|--------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                      |                                            | препоръчват 4 или 5. Всяка станция трябва да има собствена система за синхронизация (GPS) и запис на данни.                                                                                                                                                                                          |
| Обработка на сигнали | Крос-корелация на широко разнесени сензори | Вместо класическо формиране на лъч, се използват методи за оценка на разликата във времето на пристигане (TDOA) между сигналите от различните станции. Поради огромните разстояния между станциите, забавянията могат да бъдат от порядъка на секунди, което изисква прецизна времева синхронизация. |

### Ограничения на съществуващите методи

Анализът на съвременните методи за микрофонни масиви показва, че стандартните решения не са приложими:

- **Nearfield Acoustic Holography (NAH)** изисква масивът да покрива целия обект и работи на много малко разстояние (5-10 см), което е неприложимо за 2 км.

- **Класическото формиране на лъч (Beamforming)** има разделителна способност, пропорционална на  $\lambda \cdot D/D$ . За да работи на 2 км, масивът трябва да е с огромен диаметър  $D$ , иначе при 20 Hz ( $\lambda=17\text{m}$ ) и  $D$  от 10м, разделителната способност би била 3.4 км, което прави локализацията невъзможна.

- **Bayesian Focusing** подобрява нискочестотната разделителна способност, но все още е метод, базиран на компактен масив (макар и с по-голяма гъвкавост спрямо разстоянието) и не решава фундаменталния проблем с дължината на вълната и нуждата от огромна апертура.

### Специфични насоки за избор на метод

За тази честотна лента (0.5 - 20 Hz) и разстояние (2 км), валидните подходи са тясно специализирани:

1. **Мрежа от микробарометри с GPS синхронизация:** Това е най-практичното решение. Всяка станция записва данни с точен времеви печат.

2. **Алгоритми за обработка:** Фокусът трябва да е върху:

- **Отстраняване на шума от вятър:** Използване на физическо потискане на вятър (пориозни тръби или плочи) около микрофона и цифрови филтри за отстраняване на кохерентния шум.

- **TDOA (Time Difference of Arrival) анализ:** Търсене на корелации между сигналите от различните станции.

- **Съпоставяне на вълновия фронт:** При такива разстояния, вълновият фронт не е плосък, а сферичен, което позволява триангулация.

3. **Детекция на движещи се обекти:** Нискочестотният шум от летателни апарати (хеликоптери, самолети) и тежки наземни машини (танкове, тежки камиони) има характерни инфразвукови компоненти. Масивът трябва да се фокусира върху **откриване и проследяване**, а не върху висококачествено "изображение" на източника.

### Препоръки за разработка

За разлика от първоначално разглежданите компактни масиви, проектът изисква подход от сферата на **геофизиката и наблюдението на атмосферата**.

1. **Препоръчителен подход:** Изграждане на **разпределена мрежа от 4-5 инфразвукови станции** с разстояние между тях от 1 до 3 километра.

2. **Критични технологии:**

- **Високочувствителни микробарометри** с нисък собствен шум под 0.5 Hz.

- **Системи за потискане на вятъра** (wind noise reduction systems) - физически филтри, които са задължителни за работа на открито.

- **Прецизна GPS синхронизация** - за да може да се измери разликата във времето на пристигане между станциите с точност до милисекунди.

3. **Алгоритми:** Важно е да се използват методи за корелационен анализ и оценка на посоката на пристигане (DOA) върху сферичен вълнов фронт.

Това е значително по-сложна и мащабна задача от конвенционален микрофонен масив, но единствено тя може да отговори на поставените физически изисквания.

Случая на микрофонен масив в честотният диапазон **16–20000 Hz** и разстоянието **до 2 км** поставят проекта в областта на **акустичното наблюдение на далечни разстояния (far-field)**. Това е значително по-различна задача от инфразвуковия мониторинг, който разгледахме по-рано. Вече не говорим за компактни микрофонни масиви за закрити пространства, а за система, която се доближава до радар или сонар, но в звуковия спектър.

Като конкретните насоки за архитектура и алгоритми, съобразени с новите параметри могат да се посочат:

### 1. Ключови предизвикателства при разстояние от 2 км

Преди да преминем към решенията, е важно да разберем физическите ограничения:

• **Атмосферна абсорбция:** Звукът се поглъща от въздуха, като затихването се увеличава драстично с честотата. Например при 20 kHz затихването е около **5-10 dB на 100 метра**, което прави невъзможно откриването на толкова високи честоти от 2 км. Ефективният ви честотен диапазон на практика ще бъде ограничен до **16 – 1000 Hz** (или по-скоро до 500 Hz) за такива разстояния.

• **Атмосферна турбулентия и вятър:** Вятърът и температурните промени създават фазови изкривявания, които разрушават кохерентността на вълновия фронт, правейки класическото формиране на лъч (beamforming) неточно.

• **Геометрия на масива:** За да имате посока (директивност) при 500 Hz ( $\lambda \approx 0.68\text{ m}$ ) на 2 км, ви е необходим масив с огромна апертура (диаметър), за да постигнете смислена разделителна способност.

### 2. Архитектура на системата

Предвид тези предизвикателства, системата не може да бъде класически "микрофонен масив" в преносим формат. Тя

трябва да бъде проектирана като **разпределена сензорна мрежа с голяма апертура**.

Препоръките при изграждане на такава система могат да обобщат (Таблица 3):

Таблица 3

| Компонент              | Препоръка                                                                                                                       | Обосновка                                                                                                                                            |
|------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Тип сензор             | <b>Нискофrequentни измервателни микрофони</b> (с висока чувствителност) или <b>микробарометри</b> (за долния край на спектъра). | Необходими са сензори с много нисък собствен шум и висока претоварваща способност, за да улавят слаби сигнали от голямо разстояние.                  |
| Геометрия на масива    | <b>Разпределена мрежа от станции</b> (микрофони), разположени на разстояние от десетки до стотици метри една от друга.          | Това създава "виртуален масив" с огромна ефективна апертура (голям диаметър), необходима за разделителна способност при дълги вълни (ниски честоти). |
| Брой сензори (станции) | <b>Минимум 4-6 станции</b> , разположени в геометрична конфигурация (напр. кръг с диаметър 100-500 м).                          | Повече станции подобряват устойчивостта на вятър и точността на триангулация.                                                                        |
| Синхронизация          | <b>GPS-синхронизирани възли</b> с точност до микросекунди.                                                                      | Поради големите разстояния, забавянията на сигнала са от порядъка на милисекунди. Нужна е прецизна синхронизация за корелационен анализ (TDOA).      |

Ключов момент в този случай е използвания алгоритъм за обработка. Класическото формиране на лъч (Delay-and-Sum или MVDR) няма да работи ефективно при тези мащаби, защото предполага или равнинен вълнов фронт (far-field), или известна позиция на източника. В случая е наличен *сферичен* вълнов фронт от неизвестен източник. Предлага се следната йерархията от методи за прилагане:

#### Етап 1: Откриване и груба локализация (TDOA & Trilateration)

- **Цел:** Да се определи дали има сигнал и откъде идва приблизително.

- **Метод:** Това е най-практичният подход за такива разстояния. Всяка двойка станции изчислява разликата във времето на пристигане (TDOA) на даден сигнал (напр. изстрел, експлозия, двигател). Чрез крос-корелация (GCC-PHAT) се намира забавянето. След това с трилатерация (хиперболично позициониране) от минимум 3 станции се определя позицията на източника.

- **Предимства:** Устойчив на шум и не изисква сложна калибрация.

#### Етап 2: Подобрена пространствена филтрация (Bayesian Focusing)

1. **Цел:** Подобряване на разделителната способност и възможност за разделяне на множество източници, особено при ниски честоти.

2. **Метод:** След като е налице груба позиция от TDOA, может да се приложи **Bayesian Focusing**. Това е обратен метод (inverse method), който решава вероятностен проблем: "Каква е вероятността в дадена точка от пространството да има източник, при дадените измервания на микрофоните?".

#### 3. Предимства:

- **Широк честотен обхват:** Работи отлично в ниските честоти, където класическият beamforming се проваля.

- **Гъвкавост на разстоянието:** Не изисква измерване в близко поле (nearfield) като NAF (Nearfield Acoustic Holography).

- **Количествена оценка:** Позволява не само локализация, но и оценка на силата на източника.

#### Етап 3: Разширена обработка с Deep Learning

1. **Цел:** Потискане на шума от вятър, турбуленция и нестационарни смущения, както и класификация на типа обект.

#### 2. Метод:

- **Neural Directional Filtering (NDF):** Това е най-съвременният подход, при който невронна мрежа (напр. FT-JNF с FiLM conditioning) се обучава да възпроизвежда желана директивна характеристика, като директно генерира маски в честотно-временната област от входовете на масива. Той може да се "препрограмира" в реално време за различни модели на насоченост и значително превъзхожда класическите методи в отношение сигнал/смущение (SDR).

- **Комбинация с традиционни методи:** Изследвания показват, че интеграцията на дълбоки невронни мрежи (DNN) за оценка на маски (за определяне кои време-честотни точки са доминирани от полезния сигнал) значително подобрява оценката на ковариационните матрици за филтри като MVDR или Multi-channel Wiener Filter.

#### Сравнителен анализ на методите

За по-добра визуализация, сравнението е представено в Таблица 4.

Таблица 4

| Метод                  | Приложимост при 2 км/16-500 Hz                          | Точност | Устойчивост на вятър             | Изчислителна сложност |
|------------------------|---------------------------------------------------------|---------|----------------------------------|-----------------------|
| Класически Beamforming | Ниска (изисква огромен масив или равнинен вълнов фронт) | Ниска   | Ниска                            | Ниска                 |
| TDOA / Трилатерация    | Висока (основен метод за откриване)                     | Средна  | Висока (при добра синхронизация) | Ниска                 |
| Bayesian Focusing      | Висока                                                  | Висока  | Средна                           | Висока                |



|                          |                                                                     |              |        |              |
|--------------------------|---------------------------------------------------------------------|--------------|--------|--------------|
| Neural Beamforming (NDF) | Потенциално много висока (изисква обучение с данни от такава среда) | Много висока | Висока | Много висока |
|--------------------------|---------------------------------------------------------------------|--------------|--------|--------------|

### Заключителни препоръки за разработка

1. **Използването на компактен масив е нежелателно:** Няма да се постигне разделителна способност на 2 км с малък масив. Звукът ще дойде като "точка" от определена посока.

2. **Фокуса трябва да е върху мрежа:** Изграждат се 4-6 станции, разположени на стотици метри една от друга, с прецизна GPS синхронизация.

3. **Желателно е прилагането на хибриден алгоритъм:**

- Препоръчително е използването на **TDOA** за първоначално откриване и груба локализация.

- При наличие на няколко станции и е необходима по-висока точност или множество източници, приложете Bayesian Focusing върху събраните данни.

- За филтрация на шума и автоматично фокусиране върху подвижни обекти, инвестирайте време в разработването или адаптирането на Neural Directional Filtering (NDF) модел, обучен със симулирани данни за разпространение на звук в атмосферата.

### 4. Литература

- Benesty, J., Huang, G., Chen, J., Pan, N. (2024). Fundamentals of Microphone Array Processing. In: Microphone Arrays. Springer Topics in Signal Processing, vol 22. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-36974-2\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-031-36974-2_3)
- Wang, X., Zheng, X., Zhang, J., Zhao, K., Chen, Z., Huang, B. (2021). Performance Optimization of Microphone Array Beamforming Based on Multi-circular Ring Microphone Arrays Combination. In: Braza, M., Hoarau, Y., Zhou, Y., Lucey, A.D., Huang, L., Stavroulakis, G.E. (eds) Fluid-Structure-Sound Interactions and Control. FSSIC 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Singapore. [https://doi.org/10.1007/978-981-33-4960-5\\_24](https://doi.org/10.1007/978-981-33-4960-5_24).
- J. Hou, L. Zeng, D. Zhao, and Y. Zhong, "A review for the noise source identification methods based microphone array," Journal of Vibroengineering, Vol. 24, No. 5, pp. 983–1001, Aug. 2022, <https://doi.org/10.21595/jve.2022.22362>
- Личков Н., В. Пехливански, Н. Лясков, Н. Пенев. Метод за едновременно регистриране на сеизмичните колебания регистрирани от няколко сензори. Сб. доклади на XVIII Международен научен конгрес „Машини. Технологии. Материали“, ISSN 2535-0021 (Print), ISSN 2535-003X (Online), 1 (18), 2021, HTC по машиностроене, с. 79-82
- Н. Личков, Я. Бойчев, В. Косев. Анализ на честотните характеристики на един клас сеизмични сигнали. Сборник доклади от IV Международна научна конференция по сигурност "CONFSEC 2020", ISSN: 2603-2953, 4, 1, HTC по машиностроене, 2020, с. 113-116
- Н. Личков, Д. Димитров, М. Христов, И. Стоянов. Класификация на колесна автомобилна техника като източник на разпространение на повърхностни сеизмични колебания в различни типове почви. Сборник доклади на IV Международна научна

конференция по сигурност "CONFSEC 2020", ISSN: 2603-2953, 4, 1, HTC по машиностроене, 2020, с. 17-20

- Н. Личков, Д. Димитров, М. Христов, И. Стоянов. Класификация на верижна техника като източник на разпространение на повърхностни сеизмични колебания в различни типове почви. Сборник доклади на IV Международна научна конференция по сигурност "CONFSEC 2020", ISSN: 2603-2953, 4, 1, HTC по машиностроене, 2020, с. 21-24
- Георгиев Н., Я. Бойчев, В. Косев. Изследване на сеизмичните колебания предизвиквани от един тип тежка колесна техника. Сб. доклади на XVIII Международен научен конгрес „Машини. Технологии. Материали“, ISSN 2535-0021 (Print), ISSN 2535-003X (Online), 4, 1 (18), 2021, HTC по машиностроене, с. 27-30
- Георгиев Н., Я. Бойчев, В. Косев. Изследване на сеизмичните колебания предизвиквани от един тип тежка верижна техника. Сб. доклади на XVIII Международен научен конгрес „Машини. Технологии. Материали“, ISSN 2535-0021 (Print), ISSN 2535-003X (Online), 4, 1 (18), 2021, HTC по машиностроене, с. 23-26
- Panevski V.S.. Compatibility between design of mechatronic systems for critical infrastructure security and technological readiness levels. International Scientific Journal "Security & Future", 4, 3, Scientific Technical Union of Mechanical Engineering "Industry-4.0", 2020, ISSN:2535-0668, 111-114
- Panevski V.S.. Possible approach for developing a model of intelligent security system applicable in its design in the quasar center of competence. International Scientific Journal "SECURITY & FUTURE", 4, 2, Scientific Technical Union of Mechanical Engineering "Industry-4.0", 2020, ISSN:2535-0668 (print), 2535-082X (online)), 47-50
- Тумбарска А.. Тенденции в развитието на нелеталните технологии и системи за защита. ИМСТЦХА-БАН, 2020, ISBN:978-619-7466-07-2, 402
- Gueorguiev, N., A. Nachev, K. Belotelova. Shielding of a Seismic Sensor from Nearby Area Interferences. IEEE Xplore, 2020, ISBN:Electronic ISBN: 978-1-7281-8840-9, Print on Demand(PoD) ISBN:978-1-7281-8113-4, DOI:10.1109/SUMMA50634.2020.9280570, pp 459-463
- Varbanov Vladimir D.. Modeling the Probability Distribution of Coordinates of Target, Detected by Two Sensors in Their Intersection Zone. 3, 4, 2018, ISSN:ISSN:2506-8016, DOI:https://doi.org/10.24018/ejers.2018.3.4.664, 57-60

# Управление процесите на кристализация на лети разливни заряди чрез рентгенов контрол

## Crystallization process control of cast explosive charges using x-ray radiography

Assoc. Prof. Krumov A., PhD.<sup>1</sup>, Assoc. Prof. Simeonova A., PhD.<sup>1</sup>,  
Institute of Metal Science, Equipment and Technology with Hydroaerodynamic Center at Bulgarian Academy of Sciences,  
67 Shipchenski Prohod Street, 1574 Sofia, Bulgaria<sup>1</sup>

**Abstract:** The present article addresses the issues related to the crystallization of organic nitro compounds, more specifically organic nitro compounds that can be used for filling ammunition by casting molten liquid explosive into the ammunition body. These compounds are characterized by low thermal conductivity and extremely slow cooling, which necessitates the investigation and control of the crystallization processes by means of X-ray analysis in order to achieve optimal results.

**Keywords:** CRYSTALLIZATION OF ORGANIC NITRO COMPOUNDS, X-RAY RADIOGRAPHY.

### 1. Въведение.

Кристализация е всеки процес на образуване на кристали при преминаване на веществото от термодинамично по-неустойчиво състояние в кристално.

Процесът на кристализация, протичаща при втвърдяването на стопено взривно вещество, залято в камерата на боеприпаса се характеризира с образуването на големи кристали, които са неразривно свързани по между си. Това обуславя неприемливи характеристики на излетия заряд, а именно – малка плътност и механична якост. Такива характеристики са в противоречие с изискванията, предявявани към разливните заряди.

Органичните нитросъединения, приложими за запълване на боеприпаси чрез леене на разтопен течен експлозив в тялото на боеприпаса имат ниска топлопроводимост и се охлаждат изключително бавно, което налага изследване и управление на процесите на кристализация с цел постигане на оптимални резултати.

Управлението на процесите на кристализация на лети разливни заряди изисква създаване на такива условия, при които се получават голямо количество центрове на кристализация и ускорение на кристализацията като цяло.

Контролът на процеса на напълване на боеприпаси по метода на леене се съвеща до наблюдение за правилно провеждане на работата по стопяването на взривното вещество, подготовката му за леене и самото леене на боеприпасите, а също така и контрол на качеството на разливните заряди чрез рентгенов контрол.

### 2. Общи изисквания към изследвания процес.

Основното предназначение на операцията подготовка на взривните вещества за леене се състои в привеждане на разтопеното вещество в такава състояние, което при охлаждане обезпечава получаване на дребнокристална структура, голяма плътност и механична якост на разливния заряд.

За да се обезпечи получаване на разливен заряд с дребнокристална структура и обусловената от това висока плътност и механична якост, разтопеното взривно вещество преди заливането в камерата на боеприпаса се подлага на предварителна кристализация чрез разбъркване при охлаждането или смесване с определено количество от същото взривно вещество в твърдо състояние. Тези операции ускоряват процеса на кристализация и способстват за образуването на голямо количество дребни кристали.

Дейностите по напълване на боеприпаси трябва да се провеждат в строго съответствие с утвърдени технологични инструкции.

Качеството и структурата на летия разливен заряд в снарядите и мините се проверяват от ОТК на завода по разрязан по оста заряд и стълбчета от взривното вещество.

Във всяка разливна вана заедно с подготовения за леене корпус се поставя един разрязан корпус, който се залива заедно с другите корпуси. На края на леенето и изстиването разрязаният корпус се отделя, а извлеченият от него разливен заряд се разрязва по оста. Плоскостта на разреза се изчиства с остър нож, избърсва се с мокра памучна кърпа и се проверява.

Освен разрязания корпус, от всяка вана се взема и по един корпус по указания на началника на ОТК. Ако корпусът няма нараняване или то е незначително, разливният заряд се извлича чрез загряване. Този корпус се установява с отвор нагоре във ваната и се запълва с вода на 5-10 cm по-долу от отвора на корпуса. Водата се нагрява до кипене. Когато взривното вещество по стените се разтопи дотолкова, че диаметърът на оставащите заготовки от твърдо взривно вещество да бъде не повече от диаметъра на отвора, корпусът се изважда от ваната и се обръща върху алуминиева плоскост.

Ако корпусът има голямо нараняване, то от разливния заряд се разпробива стълб от взривното вещество. Разпробитите стълбове се получават с използване на тръбни свредла на пробивни машини. Разпробитият стълб от взривно вещество трябва да бъде най-малко 3/4 от височината на разливния заряд, а диаметърът най-малко 3/4 от диаметъра на отвора.

Стопените заготовки и контролните стълбове, както и разливните заряди от разрязаните корпуси се изрязват с трион по оста, почистват се с остър нож, избърсват се с мокра памучна кърпа и се предават за контролен преглед.

Контрол на качеството и строежа на взривните вещества се осъществява от ОТК по разрязаната ос на разтопения или изваден заряд от взривно вещество. От всяка вана за контрол се вземат по две заготовки.

Пълненето на боеприпаси с взривни вещества може да се извърши по различни начини: леене, снековане, пресоване. Пълненето по първия метод се извършва чрез изливане на разтопен течен експлозив в тялото на боеприпаса на един или повече етапа, в зависимост от размера на боеприпасите и конфигурацията на камерата.

Не се допускат пукнатини в заряда на взривното вещество, тъй като при изстрел в местата на пукнатините възниква значително триене между частиците на заряда, което може да причини детонация на взривното вещество и преждевременно разрушаване на снаряда в канала по време на изстрел.

### 3. Метод на проверка. Рентгенографско изследване.

#### 3.1 Определяне на наличие на кухини в снаряда.

Рентгенографският лъч се разполага в равнина, която е перпендикулярна на надлъжната ос на снаряда и допирателна към основата на вътрешната му кухина. Контурът на взривния заряд трябва да е ясно очертан във всички точки. Изследването на рентгенографската снимка се извършва, за да се определи

съответствието с приложимите изисквания. Никакви изображения на оловни маски, контейнери, приспособления, идентификационни знаци или други външни белези не трябва да се проектират в областта на проверяваното взривно вещество, с изключение на определени пенетрометри и радиационни екрани, необходими за намаляване на плътността на филма до четливи нива в по-тънките области на снаряда. Такива екрани не трябва да имат никакви радиографски забележими елементи в проектираната област на инспекцията. Рентгенографското оборудване, операции и процедури трябва да бъдат квалифицирани в съответствие с MIL-STD-453 (MILITARY STANDARD: INSPECTION, RADIOGRAPHIC (27 DEC 1984)). Освен това чувствителността на радиографската техника трябва да бъде 2,0%, а минималната фотографска плътност на използвания филм да бъде не по-малка от 1,25% във всяка точка от зоната на взрива, включително основата, като максималната плътност не трябва да бъде по-голяма от тази, която позволява адекватна проверка на цялата зона на интерес.

Всички дефектоподобни характеристики в зоната на интерес на радиографското изображение се третират като дефекти, освен ако не са идентифицирани като външни артефакти или неравности на металните части. В случай че първоначалната рентгенография оставя съмнение относно приемливостта на снаряда, поради трудност при оценяването на размера, местоположението или класификацията на дефекта, снаряда се завърта около надлъжната си ос спрямо първоначалната експозиция и се правят допълнителни рентгенографии за изясняване.

Приемливостта във всички случаи се преценява въз основа на филма, даващ най-голяма проекция, освен в случаите, когато повторната рентгенография разкрива множество наслагващи се кухини, всяка от които поотделно отговаря на изискванията.

Всички допълнителни рентгенографии на снаряда за дефектни състояния се идентифицират върху филма като повторни и се съхраняват; проследяват се до оригинала.

### 3.2 Проверка на надеждността на радиографа в техниката.

Чувствителността на рентгенографската техника се определя с помощта на пенетрометри и чрез използване на стандарти, съдържащи известни дефекти. Пенетрометрите се поставят от страната на радиографския източник на снаряда. За всеки снаряд се използват три пенетрометра. При рентгенографиране на определен брой сходни снаряди честотата на проверката на чувствителността трябва да бъде не по-малка от една на всеки петдесет рентгенографии, а при въртящ се пръстен пенетрометърът се използва на една станция за всяко пълно завъртане на пръстена. Използването на еталони се ограничава до първоначалната квалификация на радиографската техника в началото на производството и на интервалите, при условие че през този интервал могат да се очакват еднакви резултати.

Чувствителността на радиографската техника се счита за задоволителна, когато изображението на пенетрометрите, включително отворите, се възприемат в съответствие с MIL-STD-453 и когато се възприемат изискваните стандарти за дефекти.

### 3.3 Проверка на фотографската плътност на филма.

Фотографската плътност на филма се определя върху филма в легиона на минималната плътност на филма в рамките на проектираната зона на взривния заряд. Плътността на филма се проверява на всеки час работа или на част от него за всеки обработващ филм. Изисква се по-голяма честота за всеки период, през който се срещат трудности при определянето на необходимата плътност. Фотографската плътност се измерва с фотоелектричен денситометър с дифузна плътност, който показва директно цифровите единици за плътност. Точността на денситометъра се поддържа чрез калибриране с фотографска таблетка на всеки час, непосредствено преди измерването

върху радиографския филм. Калибрирането се извършва при ниво на плътност на стъпковата таблетка в рамките на 0,5D от това, което се измерва на рентгенографския филм. Всяка точка на измерване на плътността върху рентгенографския филм се обозначава с кръг (направен с подходящ молив или химикал) или с диаметър не по-голям от 6 mm. Точността на всички фотографски стъпаловидни таблетки, използвани при нормална работа, се проверява ежесечно чрез калибриране на денситометъра с еталонна фотографска стъпаловидна таблетка, калибрирана от Националното бюро по стандартизация или одобрена от правителството. Референтната таблетка трябва да бъде на разположение, но трябва да бъде защитена от износване и повреда и не трябва да се използва в ежедневната работа. Всяка фотографска стъпкова таблетка, която има сериозни повреди по повърхността или показва отклонение от предишните калибрания с 0,05D или повече, се заменя с нова, неизползвана стъпкова таблетка.

### 3.4 Преглед на рентгенографската чувствителност и техники.

Чувствителността на радиографската техника се преглежда, като се представя поне една радиография на еталона и на снаряда, съдържащ пенетрометър, и копие от радиографските процедури преди началото на първоначалното производство. Тези рентгенографии се правят и обработват със същите техники, които ще се използват в производството. Освен това една рентгенография на стандартния снаряд и на снаряда, съдържащ пенетрометър, се представя за преглед веднъж месечно през първите три месеца от всеки договор и на всеки три месеца след това.

## 4. Заключение.

Използването на рентгенов контрол дава ясна представа за кристалната структура във вътрешността на летите разрывни заряди и позволява управление на процесите на кристализация на летия материал.

Рентгеновият контрол е мощен метод за безразрушителен тест за откриване на дефекти, като предимствата му се заключават основно в съкращаване на времето за контрол и икономия на материални средства.

Съвременните системи за рентгенов контрол могат да осигурят изображения с висока разделителна способност, което позволява подробен анализ на качеството и вътрешната структура на летия разрывен заряд в снарядите и мините.

Това високо ниво на детайлност позволява откриването дори на най-малките дефекти и гарантира качеството и надеждността на летите разрывни заряди.

Също така от съществено значение е, че рентгеновият контрол дава възможност за идентифициране на потенциални проблеми в самото начало на производствения процес, което позволява да се предприемат коригиращи действия, преди частите да бъдат интегрирани в крайния продукт.

### Литература:

1. Саламахин Т. М. Действие взрыва на элементы конструкции, ВИА, Москва – 1969.
2. Юхансон, К. П. Персон. Детонация взрывчатых веществах. Москва, изд. Мир – 1973.
3. Власов О. Е. Основы динамики взрыва. ВИА, Москва – 1945.
4. Снаряжение боеприпасов“, ВТС, 1972.
5. „Химия и технология на взрывните вещества“, ВТС, 1971.

## Разработване на високотехнологична система за топене и леене на органични нитросъединения във вакуумна среда

### Development of a high tech system for vacuum melting and casting of organic nitro compounds

Assoc. Prof. Krumov A., PhD.<sup>1</sup>, Assoc. Prof. Simeonova A., PhD.<sup>1</sup>,  
Institute of Metal Science, Equipment and Technology with Hydroaerodynamic Center at Bulgarian Academy of Sciences,  
67 Shipchenski Prohod Street, 1574 Sofia, Bulgaria<sup>1</sup>

**Abstract:** The article presents the results of an experimental study one of whose primary objectives was to develop a vacuum casting technology and a design for a vacuum casting installation. The system is used for melting and casting organic nitro compounds, specifically TNT, Hexotol (Composition B) and other explosives which are processed through casting in vacuum in order to remove air trapped in the melt and gases released during heating. This process results in an increase in both the density and the mechanical strength of the castings.

**Keywords:** CRYSTALLIZATION OF ORGANIC NITRO COMPOUNDS.

#### 1. Въведение.

Вакуумното леене е усъвършенстван метод, при който за да се подобри качеството на пълнене на боеприпаса и производителността на труда, камерата на боеприпаса се вакуумира преди пълнене с експлозиви.

Висококачественият разривен заряд трябва да има еднаква дребнозърнеста структура (без мехурчета, раковини и пукнатини) и висока плътност. За да се получи хомогенна дребнозърнеста структура на взривния заряд, изливането се извършва при най-благоприятното съотношение на течната и кристалната фаза в разтопеното взривно вещество. Последното се постига чрез енергично разбъркване на разтопения експлозив преди леене.

Разбъркването ускорява охлаждането на експлозивите и началото на процеса на кристализация, насърчава образуването на голям брой кристализационни центрове и следователно предотвратява появата на големи кристали.

Дребнозърнестата структура на разривния заряд му осигурява висока плътност, здравина и безопасност при изстрел, което е много важно, тъй като такъв взривен заряд може да издържи без разрушаване на напреженията, които се развиват в него под действието на инерционните сили по време на изстрел.

#### 2. Изисквания към материала.

Материалът трябва да бъде в съответствие с приложимите чертежи и спецификации.

Чист взривоопасен скрап (брак). Чистият взривен скрап, произведен при редовни операции, може да бъде претопен и използван повторно, при условие че отговаря на изискванията за определения клас взривно вещество, с изключение на формата. Не се използва скрап от подови почиствания, вентилационни и аспирационни апарати (освен от сондажни операции, специално контролирани за предотвратяване на замърсяване с взривно вещество).

Компонентите и възлите трябва да отговарят на всички изисквания, посочени в приложимите спецификации и чертежи.

Тръбната кухня се определя като кухня, разположена на или близо до вертикалната централна линия на снаряда с надлъжна ос (дължина) три пъти или повече от ширината.

Пръстеновидната се дефинира като кухня, която приема формата на пръстен или част от него по периферията на отливката.

Кухините, образувани вследствие на отчупени или счупени експлозиви от страничните стени на взривната яма, не трябва да се простират сумарно около повече от 1/4 от обиколката. Максималният размер на всяка видима кухня в лицевата повърхност на заряда не трябва да надвишава 6,4 mm във всяка

посока, а общата площ на всички кухни не трябва да надвишава 80% от площта на повърхността.

Порестите зони се третират като кухни и за тях важат ограниченията, наложени на кухняите, с изключение на това, че 80% от дължина и 80% от площта им се считат за приемливи.

Не трябва да има забележимо разделяне на основата между основата на кухнята на снаряда и взривния заряд, когато се проверява чрез радиография. Максимално допустимото разделяне на основата трябва да бъде 0,38 mm (0,015 инча).

В снаряда не трябва да има пукнатини, тръби или участъци с тънки стени.

Във взривния заряд не трябва да има чужди материали.

Допиращите се повърхности на резбите не трябва да са покрити със спечен експлозив и всички резби не трябва да са покрити с чужд материал. Ако е необходимо химическо почистване се използва ацетон или метиленхлорид. Трябва да се внимава химическият почистващ препарат да не влезе в контакт със заряда и да не попадне в снаряда.

Твърдите взривни вещества не трябва да се намират в снаряда преди зареждането или да се добавят към снаряда по време на първоначалното изливане или охлаждане.

Не се зареждат снаряди, чиято вътрешна стена е с несъвършено покритие. Вътрешната повърхност на снаряда трябва да е суха, когато взривното вещество се излива в снаряда.

Вътрешната кухня на снаряда преди зареждане не трябва да съдържа чужди тела.

Преди сглобяването на снаряда ямката на взривателя трябва да е свободна от всякакви чужди тела или свободни взривни вещества.

Преди зареждането на взривното вещество в кухнята на снаряда не трябва да има неутвърдена локва или мехури.

Не трябва да има взривно вещество по външната повърхност на снаряда след зареждането му.

В кухнята на тялото не трябва да има люспи, ребра, задирания, следи от изтегляне, ламинации, вградени чужди тела, гънки, ями и остри ръбове в съответствие с визуалните стандарти.

Не трябва да има преждевременно разкъсване или признаци за отделяне на метални части в отвора на оръжието или по време на полет.

Когато това е посочено в договора или в поръчката за покупка, образецът се подлага на проверка за първо изделие в съответствие с техническите разпоредби.

След топлинния цикъл на снарядите, пълни с HE, не трябва да има ексудация в гнездото на взривателя или във външната част на снаряда.

Изискванията към изработката са:

- Почистване. Ако се изисква, методът на почистване не трябва да уврежда никоя от частите, нито частите да се замърсяват от почистващия агент.
- Защита на въртящите се ленти. Винаги трябва да се полагат грижи въртящата се лента на всеки снаряд да не бъде нарязана или задирана.
- Боядисване. Боядисването трябва да отговаря на изискванията на приложимия чертеж. Цялата боя трябва да е суха на допир преди тестване.
- Чужди тела. Нито една част или възел не трябва да съдържа мръсотия, грес, стружки, ръжда, корозия или други чужди тела преди проверката и транспортирането.
- Обтуратор. Винаги трябва да се внимава обтураторът да не бъде повреден.

### **3. Разработване на високотехнологична система за топене и леене на органични нитросъединения във вакуумна среда.**

Проведено е експериментално изследване, като една от основните му задачи се явява разработване на технология за леене под вакуум и на проект за инсталация за леене във вакуум среда.

Системата се използва за топене и леене на органични нитросъединения по-конкретно тротил, хексотол и други взривни вещества, обработвани чрез леене във вакуумна среда с цел премахване на съдържащия се в стопилката въздух и отделящите се при загряване газове. Това води до повишаване на плътността и механичната здравина на отливките.

В практиката е известна система за топене и леене на нитросъединения, но без възможност за вакуумиране на стопилката. Недостатъкът ѝ се състои в следното:

- Ръчен способ за подготовка и топене на органичните нитросъединения;
- Режимът на топене и леене, зависи от опита на работника;
- Системата на топене създава условия за наличие на 12% въздух в стопилката;
- Липсва оборудване за отстраняване на въздуха и горещите газове от стопилката;
- Получените отливки са с ниска плътност и голям процент вътрешни дефекти.

Предвид изложеното известно предшестващо състояние на техниката в разглежданата област, задачата е да се създаде подобрена система, която да се отличава с технологична и производствено изпълнима конструкция, като едновременно с това осигурява ефективно топене и следващо отливане на изделия с висока плътност и качество.

Така поставената задача е решена със система, състояща се от следните елементи (фиг. 1):

- Смесител за топене с непрекъснато пълнене (1);
- Бункер за темпериране и вакуумиране (2);
- Система за подгряване на течността (3);
- Система за охлаждане на течността (4);
- Циркулационни помпи с дистанционно управление (5);
- Електрически кран с дистанционно управление (6);
- Електромагнитен клапан НО (7);
- Електромагнитен клапан НЗ (8);
- Дозатори за пълнене (9);
- Вакуум помпа с дистанционно управление (10).

Смесителят за топене (1) с непрекъснато пълнене представлява цилиндричен съд с двойни стени и нагревателна серпентина, монтирана в дъното. В центъра на смесителя е монтирана електрическа разбъркваща система, въртяща се с

300 об./мин. В долния край има тръбопровод с електрически кран, свързващ бункер за темпериране. Смесителят позволява да се допълва непрекъснато с ново количество органични нитросъединения по време на технологичния процес.

Бункерът за темпериране и вакуумиране (2) е предназначен да осигурява непрекъсната температура на топене от 81°C. Към него е монтирана електронна система за поддържане на указаната температура. Към горния край на бункера е монтирана вакуумираща система, включваща вакуум помпа с електронен регулатор на оборотите.

Системата за подгряване, представлява цилиндричен съд с двойни стени и комплект нагреватели, осигуряващи мощност 18kW. Поддържането на технологичната температура се осигурява от термоконтролерна система, включваща термосензори и изпълняваща група.

Системата за охлаждане (4) е предназначена да осигурява бързо охлаждане на реагента с цел поддържане на зададена температура. Същата се състои от хладилен компресор и резервоар.

Циркулационната помпа с дистанционно управление (5) служи за придвижване на течността с различни скорости, определени от технологичния процес. Промяната на режима на работа на циркулационната помпа се извършва дистанционно по установена технологична програма.

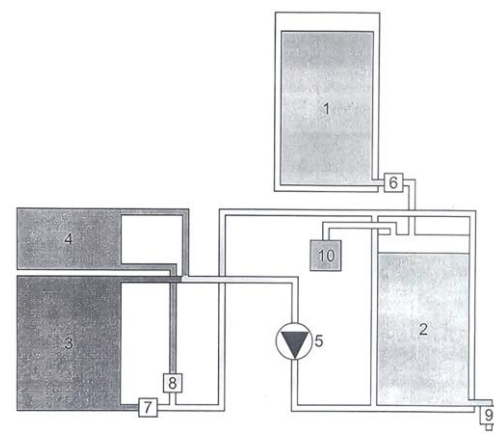
Електрическият кран с дистанционно управление (6) служи в точно определен момент да осигури захранване на бункера за темпериране със стопилка от органичните нитросъединения. Управлението на електрическия кран се извършва по предварително зададена програма.

Електромагнитният клапан НО (7) е предназначен да захрани с охладена течност бункера за темпериране с цел намаляване на температурата при кристализация на органичните нитросъединения. Сработването на същия се осигурява автоматично по сигнал от термодатчиците.

Електромагнитният клапан НЗ (8) е предназначен да захрани с гореща течност бункера за темпериране с цел увеличаване на температурата при топене на органичните нитросъединения. Сработването на същия се осигурява автоматично по сигнал от термодатчиците.

Дозаторите за пълнене (9) са четири на брой и служат за автоматично пълнене на точно определено количество разтопено органично нитросъединение във формите. Това количество се определя предварително и се изпълнява автоматично от дозатора.

Вакуум помпата с дистанционно управление (10) е предназначена да осигурява подналягане със стойност 600 mm/Hg. Включването ѝ се извършва автоматично по програма и работи за период от три минути. Достигането на определеното подналягане се измерва чрез вакуумметър, който автоматично подава сигнал за спиране на помпата.



**Фиг. 1 Система за топене и леене на органични нитросъединения във вакуумна среда.**



Следните снимки онагледяват дозаторите за пълнене на разтопения взривен материал в корпусите на боеприпасите:



4. Разработена е технология за леене под вакуум.
5. Разработена е методика за рентгенов контрол при леене под вакуум.

### *Литература:*

1. Саламахин Т. М. Действие взрыва на элементы конструкции, ВИА, Москва – 1969.
2. Юхансон, К. П. Персон. Детонация взрывчатых веществах. Москва, изд. Мир – 1973.
3. Власов О. Е. Основы динамики взрыва. ВИА, Москва – 1945.
4. Снаряжение боеприпасов“, ВТС, 1972.
5. „Химия и технология на взривните вещества“, ВТС, 1971.

### **4. Заключение.**

Основните отчетени резултати от научно-експерименталното изследване са:

1. Проведена е научно-експериментална работа по разработване на инсталация за леене във вакуум среда.
2. Изследвани са процесите на кристализация при топене на нитросъединения.
3. Изследвани са факторите, влияещи върху скоростта на образуване на центрове за кристализация и е направено проучване за влиянието на температурата върху процесите на кристализация.

# Честотно-зависим избор на подмасив за ограничаване на пространствения алиасинг в компактен петелементен линейен микрофонен масив

Владимир Върбанов

Институт по металознание съоръжения и технологии към Българска академия на науките, София, България

E-mail: vdvarbanov@abv.bg

**Abstract.** Broadband microphone arrays implemented in compact enclosures are constrained by a frequency-dependent conflict between aperture and element spacing. A large aperture is required to obtain useful low-frequency directivity, whereas small inter-element spacing is required to prevent high-frequency spatial aliasing. This paper examines a nested five-element linear array. All five microphone channels are acquired continuously, but their digital beamforming weights depend on frequency. The complete array is used below approximately 3 kHz, while only the inner three microphones are active above the transition. The 20 mm inner spacing satisfies the half-wavelength condition up to 8.575 kHz. Analytical MATLAB results show reduced high-frequency off-axis lobes while the larger five-element aperture and its higher ideal uncorrelated-noise gain are retained at low frequencies.

**Ключови думи:** микрофонен масив; лъчеобразуване със закъснение и сумиране; вложен масив; избор на подмасив; усиление спрямо бял шум

## 1. ВЪВЕДЕНИЕ

Характеристиките на микрофонния масив се определят не само от броя на преобразователите, но и от техните физически положения спрямо акустичната дължина на вълната. Поради това една и съща фиксирана конфигурация не може да осигури идеално пространствено поведение в широк честотен диапазон.

Голямата апертюра на масива е полезна при ниски честоти, тъй като създава по-големи закъснения на разпространение и по-изразени пространствени фазови разлики. Същевременно разстоянието между равномерно разположени микрофони трябва да бъде по-малко от приблизително половината от най-късата дължина на вълната, когато се изисква еднозначно пространствено дискретизиране в целия видим ъглов сектор. Тези две изисквания трудно се удовлетворяват едновременно в компактен корпус[1].

При конвенционален лъчеобразувател със закъснение и сумиране и равномерни тегла главният лъч е широк при ниски честоти и постепенно се стеснява с нарастване на честотата. Когато разстоянията между микрофоните станат големи спрямо дължината на вълната, се появяват допълнителни странични максимуми и определянето на посоката може да стане нееднозначно. Малките междуелементни разстояния предотвратяват това високочестотно ограничение, но малката им апертюра осигурява по-слаба пространствена селективност при ниски честоти.

Конвенционалният безизкривяващ лъчеобразувател със закъснение и сумиране не проявява по принцип срыв на усиляването спрямо бял шум при ниски честоти. Основното му нискочестотно ограничение е недостатъчната насоченост. Ниско усиляване спрямо бял шум се получава, когато се използват големи положителни и отрицателни коефициенти за принудително формиране на тесен лъч от апертюра, която е малка спрямо дължината на вълната. В настоящата работа не се разглежда супердирективна или адаптивна обработка.

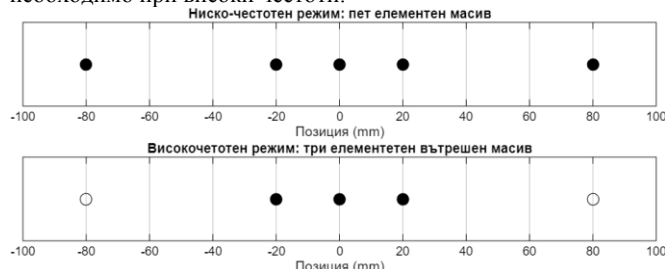
Разглежданата конфигурация използва компактен симетричен масив с пет микрофона като две припокриващи се пространствени скали. Пълната конфигурация има апертюра 160 mm, а вътрешните три микрофона образуват равномерен подмасив със стъпка 20 mm. Всички канали се дискретизират непрекъснато. Честотно-зависимите цифрови тегла определят коя ефективна апертюра участва във формирането на изходния сигнал. Целта е да се покаже компромис между нискочестотната апертюра, високочестотното пространствено дискретизиране и усиляването спрямо некорелиран шум, определено от броя на активните микрофони[2,3].

## 2. ЧЕСТОТНО-ЗАВИСИМА ОБРАБОТКА С ПОДМАСИВИ

Приема се линейен масив от пет идеални ненасочени микрофона, разположени по оста  $x$ . Ъгълът на източника в далечното поле се измерва спрямо нормалата към масива, а скоростта на звука е приета 343 m/s. Координатите на микрофоните, използвани при анализа, са

$$(1) \quad x = [-0.080 \quad -0.020 \quad 0 \quad 0.020 \quad 0.080]^T m.$$

Пълната апертюра е 160 mm. Вътрешният подмасив съдържа микрофоните при -20, 0 и 20 mm и следователно има апертюра 40 mm и равномерна стъпка 20 mm. Външните микрофони увеличават наличната нискочестотна база, докато вътрешната конфигурация осигурява по-малкото разстояние, необходимо при високи честоти.



**Фиг. 1. Геометрия и честотно-зависим избор на подмасив.**

(а) нискочестотна обработка с петте микрофона; (б) високочестотна обработка с вътрешните три микрофона. Празните маркери показват физически наличните, но цифрово изключени от високочестотния подмасив външни микрофони.

За равномерен линейен подмасив стандартното условие за пространствено дискретизиране във видимия ъглов сектор е

$$(2) \quad d \leq \frac{c}{2f_{max}},$$

където  $d$  е междуелементното разстояние,  $c$  е скоростта на звука, а  $f_{max}$  е максималната честота. При  $d = 20$  mm и  $c = 343$  m/s съответната гранична честота е 8.575 kHz. Следователно вътрешният триелементен подмасив удовлетворява това условие в целия разглеждан диапазон 300 Hz-8 kHz. Пълната петелементна геометрия е неравномерна, със съседни разстояния 60, 20, 20 и 60 mm. Поради това тя не трябва да се разглежда като периодичен равномерен масив с една точно определена честота на поява на решетъчни лъчи. Въпреки това големите външни бази формират силни високочестотни странични максимуми в изчисления отклик.

За плоска вълна в далечното поле векторът на насочване в честотната област се записва като

$$(3) \quad a(f, \theta) = \begin{bmatrix} e^{-jk x_1 \sin \theta} \\ e^{-jk x_2 \sin \theta} \\ \vdots \\ e^{-jk x_M \sin \theta} \end{bmatrix},$$

където  $k = 2\pi f/c$ ,  $x_m$  е положението на микрофон  $m$ , а  $\theta$  е ъгълът спрямо нормалата към масива. При насочване по нормалата нормализираният пространствен отклик се определя от

$$(4) \quad B(f, \theta) = w^H(f) a(f, \theta).$$

където горният индекс  $H$  означава ермитово транспониране. Използват се конвенционални тегла за закъснение и сумиране, като векторът на теглата е равен на вектора на насочване по нормалата, разделен на броя на активните микрофони.

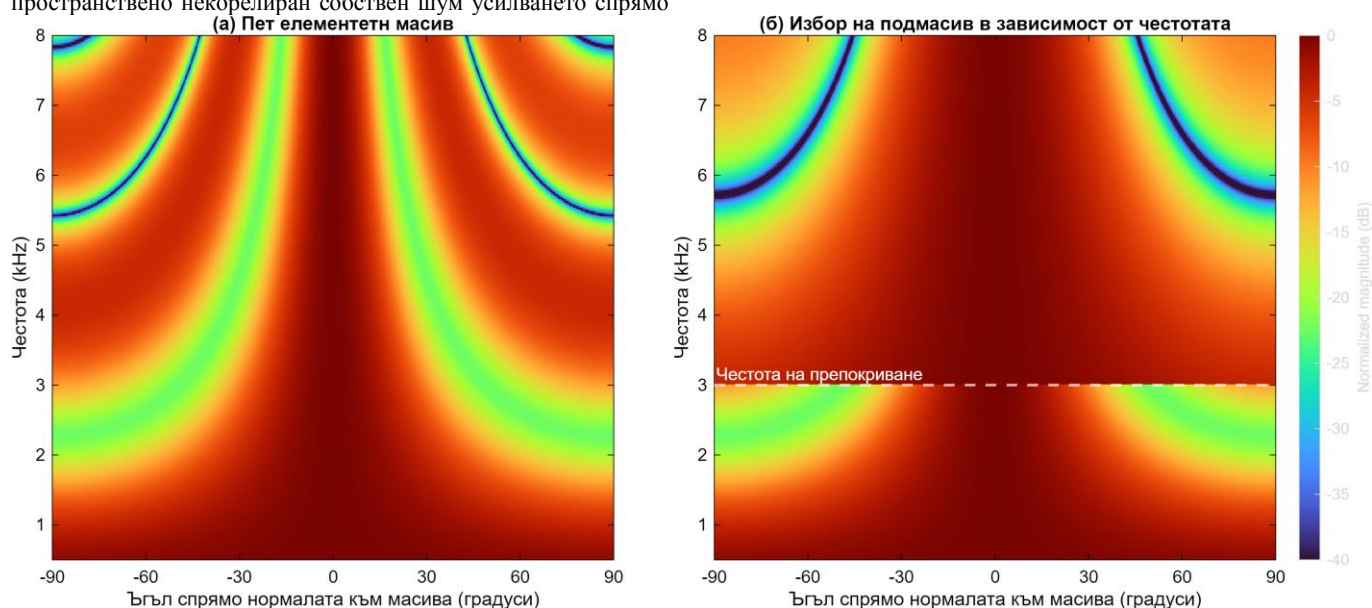
Следователно откликът в направлението на насочване е единичен и за двете активни конфигурации.

Сигналят от всеки микрофон се приема непрекъснато. Под избраната честота на преход приблизително 3 kHz на всички пет канала се задават еднакви тегла за закъснение и сумиране. Над прехода теглата на микрофоните при -80 и 80 mm се задават на нула, а трите вътрешни канала запазват еднакви тегла. Тази операция представлява цифров избор на подмасив и не изисква физическо превключване или изключване на микрофони. При реализация във времевата област могат да се използват допълващи се подлентови филтри за плавен преход. При реализация в честотната област същото поведение се получава директно чрез честотно-зависими тегла[4,5].

Използването на пет активни микрофона при ниски честоти не създава само по себе си силна насоченост, когато честотата клони към нула. То обаче запазва по-голямата физическа апертура и по-голям брой независими наблюдения на собствения шум на преобразувателите. При идеално нормализирано лъчеобразуване със закъснение и сумиране и пространствено некорелиран собствен шум усилването спрямо

бял шум е  $10 \log_{10}(M)$  dB. Пет активни микрофона осигуряват приблизително 6.99 dB, а три активни микрофона - приблизително 4.77 dB. Използването само на вътрешния подмасив в целия диапазон би довело до допълнителна идеална загуба около 2.22 dB. Запазването на петте микрофона под честотата на преход предотвратява това ненужно нискочестотно намаление.

Числената оценка е извършена в MATLAB за насочване по нормалата към масива и плоска вълна в далечното поле. Изследвани са честоти от 300 Hz до 8 kHz и ъгли от -90 до 90 градуса. Сравнени са два случая: петелементната конфигурация в целия честотен диапазон и честотно-зависима обработка с пет микрофона под 3 kHz и само с вътрешните три над тази честота. За всяка честота изчислената амплитуда на отклика е разделена на максималната си стойност преди преобразуването в децибели. Следователно картите показват само ъгловата селективност; те не показват абсолютна амплитуда на сигнала, акустична мощност, чувствителност или усилване спрямо бял шум.



Фиг. 2. Нормализирана амплитуда на отклика на масива при насочване по нормалата.

(а) петелементната конфигурация се използва в целия честотен диапазон; (б) пет микрофона под 3 kHz и вътрешните три микрофона над 3 kHz. Всеки честотен ред е нормализиран независимо до 0 dB.

### 3. РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЯ

На фиг. 2а е представена нормализираната амплитуда на отклика, когато петте микрофона се използват в целия честотен диапазон. При ниски честоти откликът е широк, тъй като апертурата остава малка спрямо дължината на вълната. С увеличаване на честотата основният отклик се стеснява, но се развиват и допълнителни странични максимуми. Най-силните високочестотни области се появяват близо до краищата на видимия ъглов сектор и изменят положението си с честотата. Те могат да създадат пространствена нееднозначност, защото източник, разположен далеч от направлението по нормалата, може да предизвика отклик, сравним с този в областта на главния лъч.

Това поведение е следствие от използването на големите външни бази при честоти, за които фазовите разлики надхвърлят областта на еднозначно пространствено дискретизиране. Тъй като пълната геометрия е неравномерна, структурата на страничните максимуми не е периодичната структура на равномерен петелементен масив. Поради това изчислената карта се интерпретира непосредствено, без на пълната конфигурация да се приписва един точно определен ъгъл на решетъчен лъч.

На фиг. 2б е показан резултатът при честотно-зависим избор на подмасив. Откликът под 3 kHz е идентичен с този на

пълната конфигурация, защото всички пет микрофона остават активни. При прехода теглата на външните микрофони стават нула и ефективната апертура се променя към вътрешния подмасив с апертура 40 mm. Над прехода широките високочестотни странични области, видими на фиг. 2а, се премахват в по-голямата част от горния диапазон. Оставшият отклик се определя от равномерната стъпка 20 mm, която удовлетворява условието за половин дължина на вълната до приблизително 8.6 kHz.

Високочестотният отклик на вътрешния подмасив не е равномерно по-тесен от отклика на пълния масив. Намаляването на ефективната апертура неизбежно разширява главния отклик и изменя структурата на страничните максимуми. Това е търсеният компромис: методът приема по-малка високочестотна апертура и по-малък брой активни преобразуватели в замяна на по-чист пространствен отклик без силни нееднозначни максимуми в разглеждания диапазон.

Хоризонталната граница около 3 kHz се вижда във втората карта, тъй като илюстрацията използва непосредствен честотно-зависим избор. В практическа широколентова система рязката граница може да бъде заменена с допълващи се филтри или с кратка преходна област, в която теглата на външните микрофони намаляват плавно. Такава филтрация би изгладила промяната между двете ефективни апертури, без да изменя

основния принцип или високочестотната граница на пространствено дискретизиране на вътрешния масив[5].

Всички редове в двете карти са нормализирани поотделно спрямо собствения им максимум по нормалата. Следователно стойностите 0 dB не означават еднакво абсолютно изходно ниво при всички честоти. Графиките не могат да се използват за сравняване на акустична мощност, чувствителност на микрофоните или абсолютно усиление на масива. Те показват само ъгловото изменение на нормализираната амплитуда на отклика. Намаляването на броя на активните микрофони от пет на три трябва да се оценява отделно чрез аналитичните стойности на усиляването спрямо бял шум.

Числените резултати подкрепят ограничен инженерен извод. Петелементната геометрия е полезна при ниски честоти, тъй като запазва апертурата 160 mm и идеалното усиление спрямо некорелиран шум на пет активни канала. При високи честоти вътрешната триелементна геометрия осигурява по-малка равномерна стъпка и по-малко нееднозначен отклик. Методът не формира честотно-инвариантна насоченост и не преодолява загубата на нискочестотна пространствена селективност, присъща на компактният масив. Той единствено избира по-подходящата от две налични пространствени скали според честотата.

Настоящата оценка приема идеални ненасочени микрофони, точни положения, разпространение в свободно поле и плоска вълна в далечното поле. Не са включени разлики между преобразувателите, дифракция от корпуса, отражения и ефекти на близкото поле. Резултатите са аналитични изчисления в MATLAB, а не експериментални измервания. Тези ограничения не променят аргумента за пространственото дискретизиране, но преди количествена оценка на практическите характеристики е необходима експериментална проверка.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разгледан е прост метод за честотно-зависима обработка на компактен вложен линеен масив с пет микрофона. Всички пет канала остават непрекъснато налични, а цифровите тегла избират пълната апертюра 160 mm под приблизително 3 kHz и вътрешния триелементен подмасив със стъпка 20 mm над прехода. Изчисленията честотно-ъглови отклици показват силни високочестотни странични максимуми, когато пълната геометрия се използва в целия диапазон, и по-чист високочестотен отклик след избора на вътрешния подмасив. Запазването на петте микрофона при ниски честоти предотвратява и допълнителната идеална загуба на усиление спрямо бял шум, свързана с обработка само на три канала в целия диапазон. Методът е целенасочено ограничен и не претендира за постоянна широчина на лъча или за експериментално измерени характеристики. Бъдеща работа може да провери конфигурацията с реални микрофони и плавна кросоувърна реализация.

#### 5. ЛИТЕРАТУРА

- [1] B. D. Van Veen and K. M. Buckley, "Beamforming: A versatile approach to spatial filtering," *\*IEEE ASSP Magazine\**, vol. 5, no. 2, pp. 4–24, 1988, doi: 10.1109/53.665.
- [2] D. B. Ward, R. A. Kennedy and R. C. Williamson, "Theory and design of broadband sensor arrays with frequency invariant far-field beam patterns," *\*Journal of the Acoustical Society of America\**, vol. 97, no. 2, pp. 1023–1034, 1995, doi: 10.1121/1.412215.
- [3] S. Repetto and A. Trucco, "Designing superdirective microphone arrays with a frequency-invariant beam pattern," *\*IEEE Sensors Journal\**, vol. 6, no. 3, pp. 737–747, 2006, doi: 10.1109/JSEN.2006.874019.

- [4] O. Rosen, I. Cohen and D. Malah, "FIR-based symmetrical acoustic beamformer with a constant beamwidth," *\*Signal Processing\**, vol. 130, pp. 365–376, 2017, doi: 10.1016/j.sigpro.2016.07.019.
- [5] I. Moazzen, S. Harrison, P. Agathoklis and P. F. Driessen, "A nested microphone array for broadband audio signal processing," in *\*Proceedings of the 2013 IEEE Pacific Rim Conference on Communications, Computers and Signal Processing\**, pp. 377–382, 2013, doi: 10.1109/PACRIM.2013.6625506.
- [6] J. Yu and K. D. Donohue, "Geometry descriptors of irregular microphone arrays related to beamforming performance," *\*EURASIP Journal on Advances in Signal Processing\**, vol. 2012, article 249, 2012, doi: 10.1186/1687-6180-2012-249.

Финансиране: Настоящото изследване беше финансирано по програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г., съфинансирана от Европейския съюз, проект BG16RFPR002-1.014-0008 „Устойчиво развитие на Център за компетентност „Квазар“.



# Macrosimulation-based evaluation of a planned urban arterial: the extended branimirova street in sesvete, Zagreb

MSc Toni Tomić, Dr. Karlo Babojelić

University of Zagreb, Faculty of Transport and Traffic Sciences, Zagreb, Croatia

E-mail: toni.tomic@fpz.unizg.hr, karlo.babojelic@fpz.unizg.hr

**Abstract:** *Zagrebačka Road is the most heavily loaded corridor in Sesvete, the easternmost district of Zagreb, Croatia, and the city's planning documents foresee the extended Branimirova Street as a second longitudinal to relieve it. This paper evaluates the conceptual design of that arterial with a calibrated macroscopic model. Morning-peak origin–destination demand was obtained from unmanned-aerial-vehicle traffic counts at five key intersections and assigned in a PTV Visum subnetwork calibrated against the counts ( $R^2 = 0.91$ ). Two design variants were tested under identical demand: one following the General Urban Plan and one with two additional junctions. Both reduce the daily volume on Zagrebačka Road by about 22–23% and attract 12000–15000 vehicles per day to the new corridor, while the second adds only local benefit. Fuel use and  $CO_2$  fall correspondingly on the relieved corridor.*

**Keywords:** *traffic macrosimulation, PTV Visum, urban arterial, origin–destination matrix, UAV traffic counts, network assignment, traffic redistribution, Sesvete*

## 1. Introduction

Sesvete is the easternmost and one of the fastest-growing districts of the City of Zagreb. Its road network relies on a single continuous east–west corridor, Zagrebačka Road, which simultaneously performs collector, transit and access functions and is the most heavily loaded road in the area, congested during the morning and afternoon peaks [1,2]. The growth of the urban area has increased travel demand and exposed the absence of an alternative longitudinal corridor.

To relieve Zagrebačka Road, the City's spatial and transport planning documents the General Urban Plan (GUP) and the Master Plan of the transport system foresee a second urban longitudinal, the extended Branimirova Street, intended to take over part of the transit traffic and rebalance the network [1,2]. The two documents envisage a pair of urban longitudinals (Zagrebačka Road and the extended Branimirova Street) complemented by transversal links, a pedestrian zone in the historic centre, and a long-term target that public transport and non-motorised modes carry at least two-thirds of daily urban trips. The first construction stage of the new arterial has been built; the conceptual design of the remaining stages and the quantification of their network-wide effect remained open.

Macroscopic four-step and assignment model implemented here in PTV Visum [3,4] are the standard tool for evaluating how a planned network change redistributes existing demand across competing routes. Unmanned-aerial-vehicle (UAV) observation has recently emerged as an efficient means of collecting accurate multi-intersection turning counts to feed such models [5]. Microscopic simulation would resolve junction-level delay and level of service but requires considerably more input data and suits a small number of intersections; for the corridor-level redistribution question addressed here, the macroscopic level offers the appropriate balance of detail and effort.

This paper, condensed from a master's study, applies this approach to the extended Branimirova Street. Morning-peak origin–destination (OD) demand obtained from UAV counts is assigned in a calibrated PTV Visum subnetwork, and two conceptual design variants one strictly following the GUP and one with two additional local junctions are compared in terms of network-wide traffic redistribution and a first-order environmental screening. The contribution is a reproducible UAV-to-Visum workflow applied to a real planned corridor, together with a quantitative variant comparison that supports the planning decision.

## 2. Materials and methods

Sesvete lies at the eastern edge of Zagreb, close to the A3 (Bregana–Lipovac) and A4 (Zagreb–Goričan) motorways and the city bypass, and on the busy Zagreb–Dugo Selo rail corridor, which exposes it to transit traffic. The extended Branimirova Street is being delivered in stages; the first stage, between Zagrebačka Road and Brestovečka Road, is complete and was surveyed on site, while the second and third stages are the subject of this study (fig. 1).



fig. 1. The extended Branimirova Street by construction stage in Sesvete.

Zagrebačka Road today combines the functions of a collector, transit and access road, which is the root of its congestion. The GUP additionally plans a pedestrian zone around Trg Dragutina Domjanića in the town centre next to the Sesvete bus terminal and railway station, the main intermodal node of eastern Zagreb which would divert still more through traffic onto the new corridor.

Traffic was counted at the five key intersections of Zagrebačka Road with Varaždinska Road, Bistrička Street, Anke Krizmanića Street, Ljudevita Posavskog Street and Kneza Branimira Street. Recording used a UAV on representative workdays (Tuesday–Thursday) during the morning peak hour (07:00–08:00) in four 15-minute intervals, providing accurate turning counts for every approach. Vehicles were classified and converted to passenger car units (PCU), and the turning movements were aggregated into an OD matrix for each intersection. Table 1 lists the total entering peak-hour volumes; the busiest, with Ljudevita Posavskog Street, carried 3901 PCU/h, dominated by the through movement along Zagrebačka Road.

Table 1. Total entering peak-hour volumes by intersection.

| Intersection (with Zagrebačka Rd) | Legs | PCU/h |
|-----------------------------------|------|-------|
| Varaždinska Road                  | 4    | 2718  |
| Bistrička Street                  | 4    | 3123  |
| Anke Krizmanića Street            | 3    | 3202  |
| Ljudevita Posavskog Street        | 3    | 3901  |
| Kneza Branimira Street            | 4    | 3610  |

A subnetwork covering Sesvete Zagrebačka Road, the built first stage of Branimirova, Brestovečka Road, Varaždinska Road and the surrounding main streets was extracted from a city-wide PTV Visum model using its Subnetwork function, which isolates the Sesvete area together with its boundary flows so that it can be analysed without simulating the whole city. The measured peak-hour demand was assigned with an equilibrium procedure, in which travellers shift to faster routes until no alternative offers a shorter generalised cost (Wardrop's first principle) [6]. Hourly volumes were expanded to average daily traffic with a factor of ten. The existing-state assignment yields 35916 veh/day on Zagrebačka Road, 2163 veh/day on the first stage of Branimirova, and about 7100 veh/day on each Varaždinska branch (fig. 2).





fig. 2. Existing-state daily traffic volumes on the Sesvete subnetwork (PTV Visum).

The model was calibrated against the counts (fig. 3). The correlation between modelled and observed volumes is strong (coefficient of determination 0.91 over 30 observations), although the regression slope of 1.41 and the mean relative error of 37% indicate a systematic over-assignment; the model is therefore used for relative, between-scenario comparison rather than for absolute forecasting.

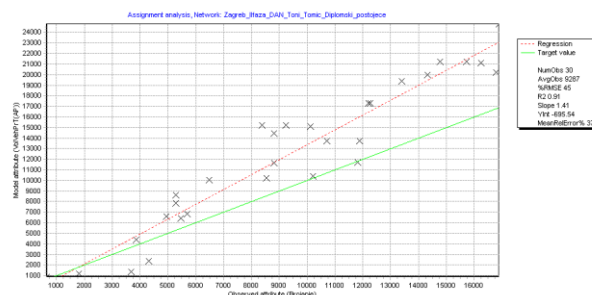


fig. 3. Calibration: modelled versus observed volumes (PTV Visum).

Both variants were drawn in AutoCAD on the cadastral parcel layer. The designed section is 2880 m long with four junctions (two four-leg and two three-leg) and a cross-section replicating the built first stage: two carriageways with two lanes each, a central median, a green strip separating a two-way cycle track and footway, and bus bays [7]. On the built stage these elements measure 3.35 m for the traffic lanes, a 1.93 m central median and a 1.82 m green strip, and the conceptual design adopts the same cross-section. Variant 1 follows the GUP; Variant 2 keeps the same junctions but adds two local connections (to Krste Hegedušića and Miroslava Kraljevića streets) that are not foreseen by the GUP. The measured demand was held constant across all scenarios, so the differences in link volume reflect route choice and redistribution only. fig. 4 and fig. 5 show the two alignments.

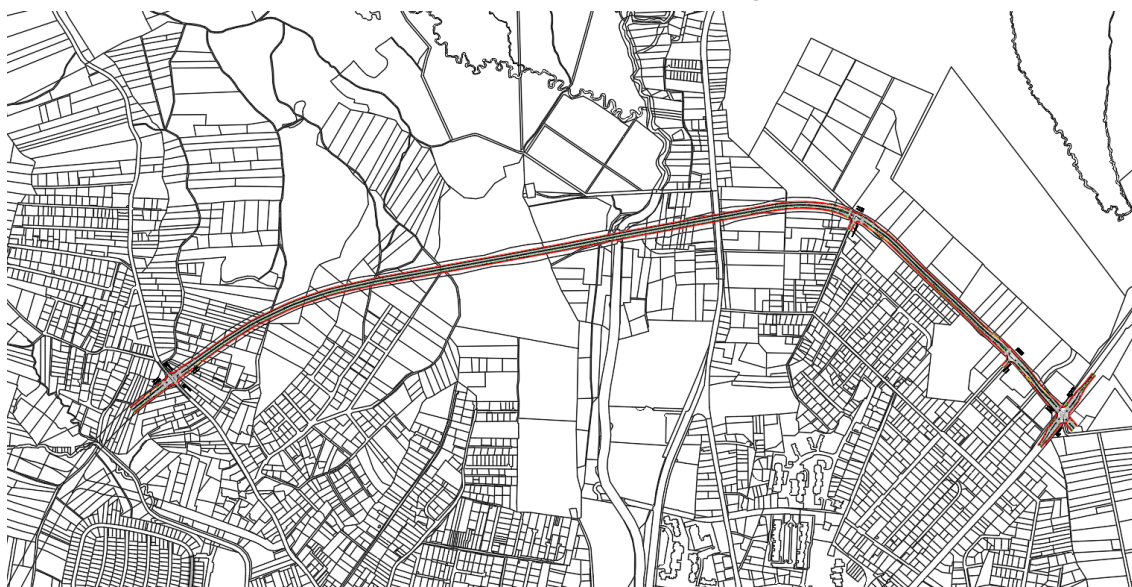


fig. 4. Variant 1 — design following the General Urban Plan (AutoCAD).



fig. 5. Variant 2 — GUP design with two additional local junctions (AutoCAD).

### 3. Results and discussion

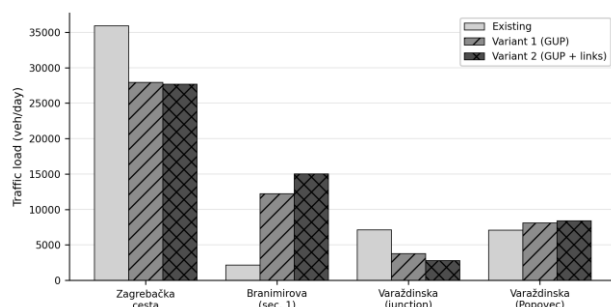
Both design variants substantially relieve the critical corridor. The daily volume on Zagrebačka Road falls from 35916 to 27954

veh/day with Variant 1 (–22%) and to 27711 veh/day with Variant 2 (–23%). The new corridor is well used: the first stage of Branimirova carries 12217 veh/day (Variant 1) and 15032 veh/day (Variant 2), decreasing along the second and third stages to about

8000 veh/day, so the strongest volume occurs nearest the Zagrebačka junction and tapers toward the north. The northern branch of Varaždinska Road toward the Zagrebačka junction drops sharply (−47% and −60%) as traffic reroutes onto Branimirova, while the branch toward Popovec rises slightly (+14% and +19%). Table 2 and fig. 6 summaries the volumes at the key locations.

**Table 2. Daily traffic volumes [veh/day].**

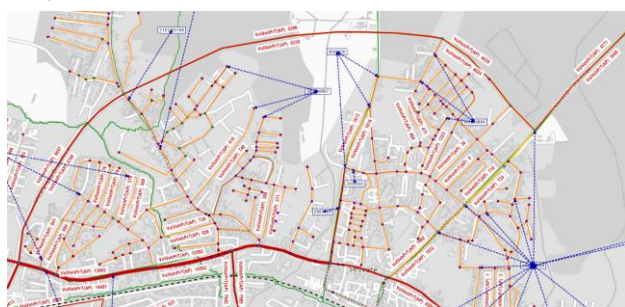
| Road / section        | Existing | Variant 1 | Variant 2 |
|-----------------------|----------|-----------|-----------|
| Zagrebačka Road       | 35916    | 27954     | 27711     |
| Branimirova, sec. 1   | 2163     | 12217     | 15032     |
| Branimirova, sec. 2   | –        | 10726     | 11570     |
| Branimirova, sec. 3   | –        | 8063      | 8107      |
| Varaždinska (north)   | 7121     | 3794      | 2829      |
| Varaždinska (Popovec) | 7101     | 8120      | 8420      |



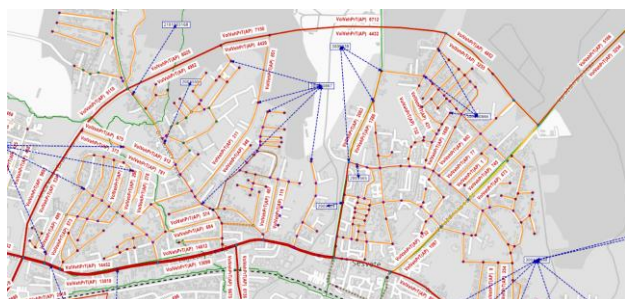
**fig. 6. Daily traffic volumes at key locations: existing state versus the two design variants.**

The redistribution confirms the intent of the planning documents: the extended Branimirova draws the through traffic that today has no alternative to Zagrebačka Road, and the strongest relief is achieved on its most congested southern section, nearest the city of Zagreb.

The assigned network volumes for the two variants are shown in fig. 7 and fig. 8. In both, the new corridor visibly absorbs the redistributed flow while Zagrebačka Road and the northern Varaždinska branch lighten. Relative to Variant 1, Variant 2 changes the volume on Zagrebačka Road by only about 1% a negligible difference which shows that the two additional junctions do not materially improve relief of the main corridor. Their effect is local: they increase the volume on the first stage of Branimirova (+23%) and further unload the northern Varaždinska branch (−25%). Variant 2 therefore improves local accessibility and distribution rather than the strategic corridor relief that both variants already deliver.



**fig. 7. Assigned daily volumes for Variant 1 (PTV Visum).**



**fig. 8. Assigned daily volumes for Variant 2 (PTV Visum).**

From a planning perspective, the staged construction foreseen by the GUP is justified on traffic grounds: Variant 1 alone delivers essentially all of the corridor relief, so the scheme can proceed stage by stage without the benefit being contingent on the additional junctions. Those junctions, which define Variant 2, are best evaluated separately, on the value of the local access they create rather than on any further unloading of Zagrebačka Road.

The environmental screening, based on HBEFA-type emission factors [8], follows the same pattern (Table 3). On Zagrebačka Road, fuel consumption falls by 22% (Variant 1) and 25% (Variant 2) and CO<sub>2</sub> emissions by 21% and 25%, in line with the reduced volume, while the corresponding burden shifts onto the new corridor. These figures are indicative only, as they were obtained with the student edition of the software; the inconsistent particulate-matter outputs were omitted, and a full-edition network-total accounting, including noise, is left for future work.

**Table 3. Emission indicators on Zagrebačka Road (PTV Visum).**

| Indicator            | Existing | Variant 1 | Variant 2 |
|----------------------|----------|-----------|-----------|
| Fuel [kg]            | 1444     | 1125      | 1076      |
| CO <sub>2</sub> [kg] | 4150     | 3259      | 3117      |

Several limitations should be noted. The analysis rests on a single morning-peak campaign and on present-day demand, without a horizon-year forecast, and uses a static macroscopic assignment without junction-level delay or level of service. The calibration shows a systematic over-assignment, so absolute volumes should be read comparatively. Future work includes extending the counts to the afternoon peak and the full day, applying the Master Plan growth forecasts, recalibrating with the GEH statistic, microsimulating the key junctions, and adding multimodal scenarios in line with the GUP target of two-thirds of daily trips being made by public and active modes.

## 4. Conclusion

This paper evaluated the conceptual design of the extended Branimirova Street with a UAV-fed, calibrated PTV Visum macrosimulation. Both design variants relieve Zagrebačka Road by about 22–23% and establish Branimirova as a genuine second longitudinal carrying 12000–15000 veh/day, with a corresponding fall in fuel use and CO<sub>2</sub> on the relieved corridor. The two additional junctions of Variant 2 bring only local benefit (about −1% on the main corridor), so the GUP-compliant Variant 1 is the cost-effective choice for strategic relief. The workflow from drone counts to a calibrated subnetwork model is transferable to other planned urban arterials and provides quantitative support for the planned investment, subject to the calibration and demand-horizon refinements identified above.

## 5. References

1. *Master Plan of the Transport System of the City of Zagreb, Zagreb County and Krapina-Zagorje County*, City of Zagreb, 2017 (in Croatian).
2. *General Urban Plan of the City of Zagreb (GUP)*, City of Zagreb (in Croatian), <http://geoportal.zagreb.hr>.
3. Ortúzar J. de D., L. G. Willumsen, *Modelling Transport*, 4th edn., John Wiley & Sons, Chichester, 2011.
4. PTV AG, *PTV Visum 2023 User Manual*, PTV Planung Transport Verkehr GmbH, Karlsruhe, 2023.
5. Barmounakis E., N. Geroliminis, On the new era of urban traffic monitoring with massive drone data: the pNEUMA large-scale field experiment, *Transportation Research Part C*, 111, 50–71, 2020.
6. Wardrop J. G., Some theoretical aspects of road traffic research, *Proc. Institution of Civil Engineers, Part II*, 1(3), 325–362, 1952.
7. Novačko L., H. Pilko, *Cestovne prometnice II*, Faculty of Transport and Traffic Sciences, University of Zagreb, Zagreb, 2017 (in Croatian).
8. Keller M., S. Hausberger, et al., *Handbook Emission Factors for Road Transport (HBEFA)*, version 4.1, INFRAS, Bern, 2019.



# СРАВНИТЕЛЕН АНАЛИЗ НА НЯКОИ МЕТОДИ ЗА ИЗЧИСЛЕНИЕ НА КРЪСТОСАНО АРМИРАНИ ПЛОЧИ

Антон Гороломов  
Висше строително училище „Любен Каравелов“ София, Bulgaria  
[tonyngor@gmail.com](mailto:tonyngor@gmail.com)

## COMPARATIVE ANALYSIS OF SOME METHODS FOR CALCULATION OF TWO WAY REINFORCED CONCRETE SLABS

Anton Gorolomov  
University of Structural Engineering and Architecture "Lyuben Karavelov" Sofia, Bulgaria  
[tonyngor@gmail.com](mailto:tonyngor@gmail.com)

**Резюме:** Стоманобетонните плочи са основен градивен елемент в строителството. Не случайно съществуват множество аналитични и числени методи за статическото им изчисляване. В настоящият доклад се прави сравнителен анализ на някои методи за изчисляване на кръстосано армирани полета. Като референтен метод за сравнение е избран метода на Маркус поради сравнително доброто му съвпадение с резултатите получени по МКЕ със софтуерни продукти. В резултат на параметричното изследване са формулирани съответни изводи и са набелязани насоки за бъдещо изследване.

**Keywords:** стоманобетонни плочи, кръстосано армирани полета, метод на Маркус, Метод по преразпределение на усилията, огъващи моменти

**Abstract:** Reinforced concrete slabs are a basic building element in construction. It is no coincidence that there are many analytical and numerical methods for their static analysis. This report makes a comparative analysis of some methods for calculating two way slabs. The Marcus method was chosen as a reference method for comparison due to its relatively good agreement with the results obtained by FEM analysis with software products. As a result of the parametric study, relevant conclusions were formulated and directions for future research were outlined.

**Keywords:** reinforced concrete slabs, two way slabs, Marcus method, Yield line method, bending moments

### 1. Въведение

Стоманобетонните плочи се явяват основен конструктивен елемент в сградите и инженерните съоръжения. В зависимост от начина им на подпиране различаваме гредови и безгредови плочи. Последните допускат по-гъвкава планировка на помещенията, както и по-бързо и по-евтино изпълнение на кофражните работи. Основен недостатък при тях е по-голямата им дебелина при равни подпорни разстояния спрямо гредовите, както и по-голямото количество вложена армировка. В това отношение предимството е на страната на гредовите плочи. При тях гредите разделят плочата на полета, които в зависимост от отношението на светлите си отвори се изчисляват и конструират като еднопосочно или кръстосано армирани. Предмет на настоящия доклад са именно те и по-конкретно методите за статическото им изчисляване. По подробно запознаване с различните аналитични методи за решаване на кръстосано армирани плочи може да се направи в [8], [12], [14], [17] и [19].

Статическото изчисляване на кръстосано армирани плочи се извършва по два основни метода: плочите се разглеждат като еластична еластическа система или се изчисляват по метода на преразпределение на усилията. Обикновено се използват приблизителни методи удобни за практическо приложение. В нашата литература е прието изчисленията да се извършват по метода на Маркус или по метода на Гвоздев. С появата на множество достъпни програми базиращи работата си на метода на крайните елементи посочените методи се прилагат все по-рядко. Това не значи обаче, че те напълно са изгубили актуалността си. Първо изучаването им помага за по-доброто разбиране на работата на конструкцията и второ винаги могат да послужат като метод за контрол на резултатите дадени от ползвания специализиран софтуер за изчисление.

Даденият доклад прави сравнение между огъващите моменти получени по различни изчислителни методи за едни и същи подпорни условия и натоварване. Също така се изследва и влиянието на отношението между отворите на полетата в изменението на моментите при всеки от методите. Освен това тъй като методът по преразпределение на усилията допуска

сравнително широки граници при избора на съотношението между отделните моменти се разглежда и влиянието на избора на коефициентите на разпределение върху усилията в плочата. С цел улеснение на параметричното изследване за числения анализ е използвана системата за компютърна алгебра MathCAD. Изборът на MathCAD е предопределен от факта, че предлага изключително интуитивен интерфейс, както и от удобния и лесно четим формат на извеждане на резултатите. Примери за успешно използване на MathCAD в решаването на инженерно-строителни задачи може да се види в [5], [18], [24], [25], [26], [27]. Изчисленията са извършени по представените в литературните източници [6], [8], [21], [28], [29] аналитични изрази.

В случай на продължаване на параметричното изследване в посока оразмеряване и сравняване на отделните решения по отношение на вложената армировка би могло да се използва готовото решение предложено в [26] и [27].

В различни литературни източници могат да се проследят подобни на даденото изследване. В [2] например се изследват кръстосано армирани плочи решени по преразпределение на усилията, по методиката предложена в BS8110 и с помощта на компютърните програми STAAD-Pro и PROKON. В [3] се прави изследване на кръстосано армирани плочи изчислени по стандарт IS456 и с помощта на SAP2000. Няколко нормативни метода – BS 8100, IS 2000, EBCS 1995, ACI 318 се сравняват помежду си и с резултати получени при решение извършено със SAP2000 и ABAQUS в поредния източник [9]. Сравнителен анализ между метод по преразпределение на усилията (yield line method), BS8110 метода и решение получено по МКЕ с STAAD-Pro се прави и в [10]. В [33] се прави сравнение между аналитичното решение на Навие, приблизителното на Маркус и такива получени с SAP2000, LISA 8.0 и ANSYS. Подобно на горните изследвания е дадено и в [4] и [7]. Също така в [7] е използвана авторска програма за извършване на аналитичните пресмятания. Идеята за използване на авторска програма за решаване на конкретна инженерна задача също така може да се види в [23].

## 2. Използвани изчислителни методи

Таблица. 1 [20]

Коефициенти за изчисляване на положителни моменти в полето  $M_{Ed,x}^i$  по късата страна

| $\lambda = l_y / l_x$ | 1,0   | 1,2   | 1,4   | 1,6   | 1,8   | 2,0   |
|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1                     | 0,042 | 0,053 | 0,063 | 0,071 | 0,078 | 0,083 |
| 2.1                   | 0,029 | 0,040 | 0,050 | 0,058 | 0,066 | 0,072 |
| 2.2                   | 0,029 | 0,036 | 0,040 | 0,044 | 0,047 | 0,050 |
| 3.1                   | 0,021 | 0,031 | 0,040 | 0,048 | 0,056 | 0,062 |
| 3.2                   | 0,021 | 0,025 | 0,028 | 0,030 | 0,032 | 0,033 |
| 4                     | 0,022 | 0,029 | 0,034 | 0,038 | 0,042 | 0,045 |
| 5.1                   | 0,017 | 0,021 | 0,024 | 0,027 | 0,029 | 0,030 |
| 5.2                   | 0,017 | 0,023 | 0,028 | 0,033 | 0,037 | 0,040 |
| 6                     | 0,014 | 0,018 | 0,021 | 0,024 | 0,026 | 0,028 |

• Момент в поле по късата страна:  $M_{Ed,x}^i = (\text{Коефициент}) \cdot p_d l_x^2$ ;

Сравнителното параметрично изследване е проведено върху пет теоретични модела базирани на различни литературни източници и нормативна база. Първият модел се базира на метода на Маркус (опростен метод по еластична схема). Методът се основава на приравняване на провисванията на две взаимноперпендикулярни ивици с еднаква ширина изрязани по средата на плочата. Непръкъснатостта на плочата се моделира с въвеждането на така наречените извивни коефициенти. Обикновено решението на кръстосано армирани плочи по метода на Маркус се извършва по формулите:

$$(1) M_x = \frac{q l_x^2}{m_{xi}}, \quad M_y = \frac{q l_y^2}{m_{yi}},$$

където  $m_{xi}$  и  $m_{yi}$  се отчитат от таблици в зависимост от отношението на отворите на полето.

В настоящата работа се използват изведените в [28] аналитични формули.

Вторият метод за анализ на кръстосано армирани плочи, които се разглежда е методът на Гвоздев. За целта на настоящето изследване отношението между положителните моменти по късата и дългата страна е прието:

веднъж равно на  $\lambda^2$  ( $\lambda$  - отношението между отворите), което кореспондира с еластичното решение [29];

и втори път съгласно препоръките дадени в [28].

При това отношението между опорните моменти и съответните положителни моменти в е прието за 2. По отношение препоръките при избора на този коефициент може да се направи справка в [22].

Другите два метода, които се разглеждат са предложени в [6] и [20] и също по същество са разновидност на метода на преразпределение на усилията, какъвто е и метода на Гвоздев.

Моментите в полетата в [6] са изразени с помощта на формулите:

$$(2) M_x = \alpha_x q l_x^2 \text{ и } M_y = \alpha_y q l_y^2$$

където  $\alpha_x$  и  $\alpha_y$  са коефициент, който се отчитат от таблици в зависимост от  $\lambda$  и условията на подпирание.

Последният метод, който се разглежда в настоящия доклад е даден в [20]. Използват се формули аналогични на (2), като коефициентите са дадени в зависимост от подпорните условия в таблица 1.

Опорните моменти се приемат отново два пъти по-големи от съответните моменти в полето.

С цел унифициране на представянето и максимално улеснение при сравняване на резултатите е прието моментите в полето да се изчисляват по формули:

$$(3) M_x = \alpha_x q l_x^2 \text{ и } M_y = \alpha_y q l_y^2.$$

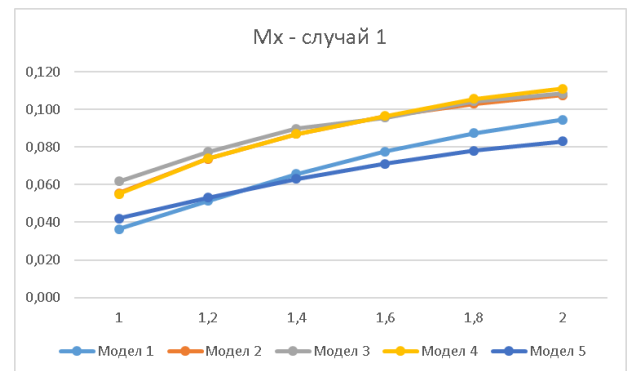
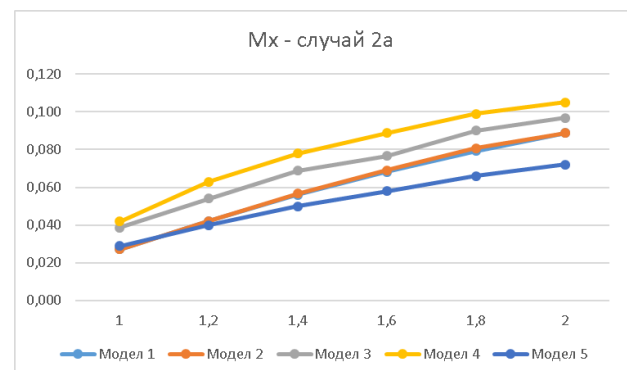
Това представяне е по-логично споре автора. За целта всички коефициенти приведени в литературните източници са преизчислени в съответствие с (3). Също така са унифицирани и случаите на подпирание в съответствие с таблица 1. Направени са и съответните преработки в аналитичните изрази така, че да отговарят на приетите по таблица 1 случаи на подпирание.

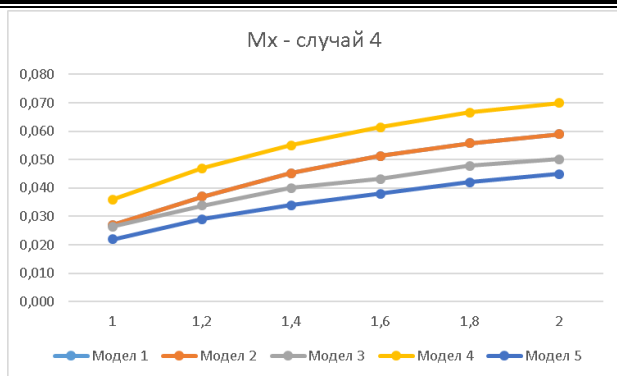
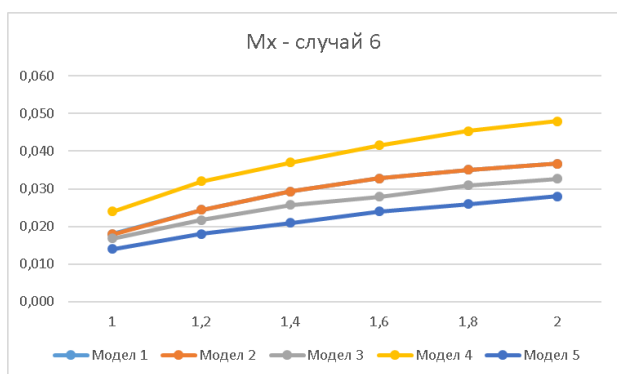
## 3. Параметрично изследване

Разгледани са пет различни модела при всички възможни условия и отношения между отворите: Модел 1 – разглежда кръстосано армирана плоча по метода на Маркус; Модел 2 – същата плоча по преразпределение на усилията с отношение между моментите съответстващо на еластичното решение; Модел 3 – решение по преразпределение на усилията но с препоръчаните от [28] отношения между моментите; Модел 4 – решението дадено в [6], което кореспондира напълно с коефициентите публикувани в [11]; Модел 5 – решението представено в указанията към Еврокод 2 [20].

С изключение на Модел 1 и Модел 3 във всички останали случаи е прието, че опорните моменти са 2 пъти по-големи от съответния момент в полето.

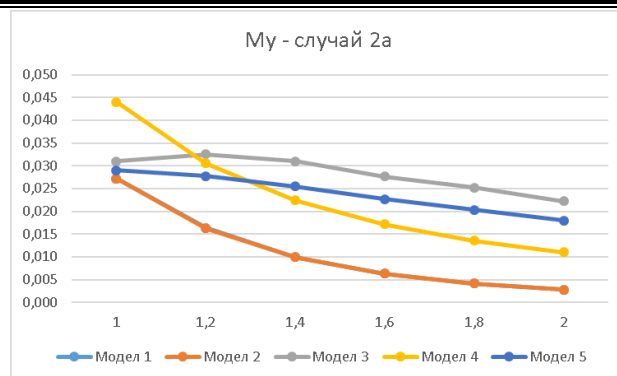
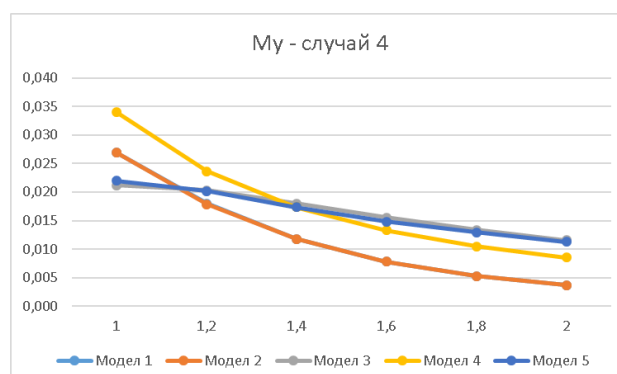
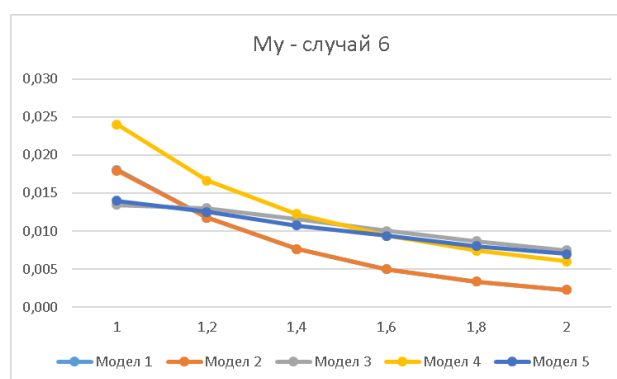
Част от резултатите от направеното параметрично изследване могат да се проследят на Фиг.1-Фиг.7.

Фиг. 1 Сравняване на  $M_x$  – случай 1 на подпираниеФиг. 2 Сравняване на  $M_x$  – случай 2а на подпирание

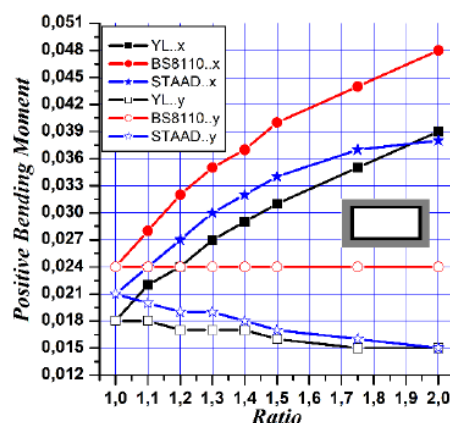
Фиг. 3 Сравняване на  $M_x$  – случай 4 на подпиранеФиг. 4 Сравняване на  $M_x$  – случай 6 на подпиране

На фиг.1 – фиг. 4 се вижда, че коефициентите за Модел 1 и Модел 2 напълно съвпадат. Последното е напълно логично при направеното приемане за отношение между момента по късата и по дългата страна. При разглеждане на самостоятелни полета решението по еластична схема и по преразпределение на усилията дават очаквано еднакви резултати. Изключение прави само случая на свободно подпряно по всичките си страни поле (случай 1). Тук се наблюдават по-близки стойности при Модел 2, Модел 3 и Модел 4. За случай 1, моментите получени по метода предложен в Модел 2 надвишават еластичните. Този факт намира своето обяснение в [29]. Освен това имайки предвид, че изчислителните отвори по еластична схема са по-големи от тези по преразпределение на усилията тази разлика се погасява. От представените резултати се вижда, че метода предложен в BS8110 [6] дава най-консервативни стойности, а метода предложен в Указанията към българската редакция на Еврокод [20] е най-икономичен. Резултатите получени по метода на Маркус заемат междинно положение. Поради тази причина, а също и заради доброто съвпадение с резултатите получен по МКЕ [2], [4], [33] при пресмятане на процентните разлики между отделните методи Модел 1 (Метод на Маркус) е приет за референтен. Вижда се, че разликите в много случаи се движат около 20%. Получените тук резултати кореспондират добре с получените в подобните изследвания [2], [4], [7], [9], [10], [33].

На фиг. 5 – фиг. 7 са представени момените по  $y$ . Вижда се, че моментите по  $y$  получават най-ниските си стойности по метода на Маркус, докато BS8110 метода отново предлага най-консервативни стойности. Тук се наблюдава сближаване на стойностите получени за Модел 3 и Модел 5. Наблюдаваното, като тенденция навежда на мисълта, че въпреки разликите в моментите от порядъка на 20% (поради факта, че разликите при единия момент са положителни, докато при другия са отрицателни) няма да доведе до толкова голяма разлика при пресмятане на арматурата.

Фиг. 5 Сравняване на  $M_y$  – случай 4 на подпиранеФиг. 6 Сравняване на  $M_y$  – случай 4 на подпиранеФиг. 7 Сравняване на  $M_y$  – случай 6 на подпиране

На фиг. 8 са представени аналогични резултати от направеното в [10] параметрично сравнение за случай 6 на подпиране. Графиката показва аналогична тенденция и близки стойности на представените на фиг.3 и фиг. 7. Това може да послужи за една допълнителна верификация за достоверността на резултатите.



Фиг. 8 Сравняване на моментите в полето – случай 6 на подпиране [10]



#### 4. Заключение

Както се вижда от фигурите, огъващите моменти, получени с методиката от [20] са най-малки, най-големите стойности се получават при изчисляване по BS8110 и средни са при метода на Маркус. Отклоненият в стойностите на моментите спрямо получените по метода на Маркус са средно от порядъка на 20%. Това съответствия с получените в разгледаните литературни източници резултати. Огъващият момент при по-късата страна винаги се увеличава с увеличаване на съотношението между отворите, докато по дългата страна той намалява, което е в съответствие с добре познатата концепция за работата на кръстосано армирана плоча. При симетрични подпорни условия моментите по дългата страна получени в Модел 3 и Модел 5 се доближават максимално при увеличаване на отношението между отворите.

При моментите над опорите традиционно се наблюдават по-големи стойности по метода на Маркус в сравнение с метода по преразпределение на усилията. В [30], [31], [32] са дадени препоръки относно получаване на по-ниски стойности за опорните моменти по Маркус.

Интересно би било в едно бъдеще изследване да се сравни икономическия ефект при армирането на плочата по всеки от разгледаните методи. Също така би могла да се изследва цяла етажна плоча, където изменението на моментите получени по метода по преразпределение на усилията би могъл да се изследва много по-точно и всеобхватно. Интересно би било и едно изследване върху предавания товар от плочата върху околните греди при метода по преразпределение на усилията при различна конфигурация на линиите на разрушение.

#### 5. Литература

1. ACI Code 1963; "Building Code Requirements for Reinforced Concrete", ACI Publication 318-63, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, (1963)
2. Adil. A. and all, Investigation of Ultimate Resisting Moment of Reinforced Concrete Slabs Systems Using Yield Line Theory. BS8110 and Computer Software", IJREAT, Volume 4, Issue 1, 37-44 (2016)
3. Agrawal U. and all, Estimation of Bending Moment Coefficients of Two Way Rc Slabs: Finite Element Approach, Indian Journal of Science and Technology, Vol 9 Issue 30 (2016)
4. Almunah A. and all, Comparative Study of BS 8110 and Eurocode 2 for Sustainable Reinforced Concrete Building Elements Using Protastructure Software, Nnamdi Azikiwe University Journal of Civil Engineering, Volume 4, Issue-3, 104-112 (2025)
5. Al-Ansari M., Regular and Irregular Plate Deflection Analysis using Matrix Method, IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering, Volume 16, Issue 1, 24-40 (2019)
6. BS8110, Part 1: Code of practice for design and construction. BSI, 2nd edition (1997)
7. Bari M. and all, Finite Element Analysis of Slab and a Comparative Study with Others Analytical Solution, 7th ICCT 2004 - M - (24) - (pp265-272)
8. Clarke L. and all, Concrete Slabs: Analysis and Design, CRC Press (2014)
9. Demewez M., T. Wondimu, A Critical Assessment of Analysis Methods of Reinforced Concrete Two Way Slabs, ICAST-CWRE-2016 (2016)
10. Fathelrahman M. and all, Analysis of Tow-Way Slab Using Yield Line Method, Nile Journal for Science and Engineering, Vol. 1, No. 1, 15 – 27 (2022)
11. How to Design Concrete Structures using Eurocode 2, A cement and concrete industry publication (2006)
12. Johansen, K., Yield Line Theory, Cement and Concrete Association, London (1962)
13. Rasheed M., B. Taha, Comparative Study Among Direct Design Method, Equivalent Frame Method and Finite Element

Method for Analysis of Slabs, Science Journal of University of Zakho (2018)

14. Park R., W. Gamble, Reinforced Concrete Slabs, Wiley (1999)
15. Shahinuzzaman, M. Rahman, Comparison of Calculated Moment Coefficients with Corresponding ACI Coefficients, Journal of Structural Engineering, its Applications and Analysis, Vol 4 Issue 3, 1-11 (2021)
16. Thavalingam, A. and all, A computerized method for rigid-plastic yield-line analysis of slabs. Computers and Structures, 68, 601-612 (1998)
17. Timoshenko, S., S. Woinowsky, Theory of plates and shells, McGraw-Hill (1959)
18. Umeonyiagu I., N. Ogbonna, Derivation of an Approximate Method for the Analyses of Ribbed Slabs (A Finite Element Approach), Journal of Materials Engineering, Structures and Computation Vol. 3, Issue 3, 12-34 (2024)
19. Балдин В. и др., Расчет строительных конструкций по предельным состояниям, Москва (1951)
20. Велинов К. и др., БДС EN 1992-1-1:УКАЗАНИЯ, КИИП, София (2021)
21. Гвоздев, А, Расчет несущей способности конструкций по методу предельного равновесия, Строиздат, Москва (1949)
22. Игнатиев Н., Стоманобетон и масивни конструкции, Техника, София (1976)
23. Любенов Л, С. Якова, Относно съвместното използване на AutoCAD и Delphi, Научна конференция с международно участие ВСУ'2007, I-149-153 (2007)
24. Любенов Л, С. Якова, Използване на MathCAD за решаване на инженерни задачи, Юбилейна научна конференция с международно участие ВСУ'2008, IX-72-76 (2008)
25. Любенов Л., Я. Михайлов, Оразмеряване на правоъгълни стоманобетонни сечения подложени на огъване по Eurocode 2 с помощта на MatCAD, XIV Международна научна конференция ВСУ'2014, Том III, 415-420, 2014 (2014)
26. Любенов Л., Я. Михайлов, Изследване на статически неопределими системи по силов метод с помощта на MathCAD, Международна научна конференция „Проектиране и строителство на сгради и съоръжения“ DCB'2014, 677-682 (2014)
27. Любенов Л., Оразмеряване на правоъгълни стоманобетонни сечения подложени на огъване с помощта на MathCAD, Механика, транспорт, комуникации, том 13, брой 3, VIII-42-47 (2015)
28. Маноилов Л., Стоманобетон, Техника, София (1991)
29. Нисимов Х., Въпроси из областта на стоманобетона, Техника, София (1964)
30. Петков С., Подпорни огъващи моменти на самостоятелни кръстосано армирани плочи от равномерно разпределено натоварване, Строителство, брой 4 (1990)
31. Петков С., Подпорни огъващи моменти на самостоятелни кръстосано армирани плочи от равномерно разпределено натоварване, Строителство, брой 5 (1990)
32. Петков С., Подпорни огъващи моменти на самостоятелни кръстосано армирани плочи от равномерно разпределено натоварване, Строителство, брой 1 (1991)
33. Стойнова И., Статичен анализ на гладка плоча по класическите методи. цифрови модели и статичен анализ на гладка плоча, XXIV Международна научна конференция ВСУ'2024, Том I, София, 375-386 (2024)

# Multi-parameter assessment of the relative electrochemical condition of reinforced concrete structures exposed to stray currents and chloride environments

Veis Šerifi<sup>1,\*</sup>, Nazim Manić<sup>2</sup>, Emir Maslak<sup>1</sup> and Vesnera Šerifi<sup>2</sup>

<sup>1</sup>State University of Novi Pazar, Department of Technical and Technological Sciences, Faculty of Civil Engineering, Novi Pazar, Serbia

<sup>2</sup>University of Pristina, Faculty of Technical Sciences, Architecture, Kosovska Mitrovica

**Abstract.** *The long-term reliability of reinforced concrete structures is strongly influenced by electrochemical deterioration processes affecting embedded steel reinforcement. In addition to conventional environmental actions, stray electrical currents may disturb the passive state of reinforcing steel and contribute to the initiation or acceleration of corrosion, particularly when combined with chloride-contaminated environments. This study proposes a multi-parameter framework for assessing the electrochemical reliability of reinforced concrete structures subjected to combined electrical and environmental actions. The assessment is based on three principal electrochemical indicators: reinforcement corrosion potential, electrical resistivity of concrete and corrosion current density. Five representative exposure scenarios are considered, ranging from a reference condition without significant electrical influence to combined exposure involving increased moisture, chlorides and simulated stray currents. The selected parameters are integrated into a dimensionless Electrochemical Reliability Index (ERI), developed to enable comparative classification of structural condition and deterioration risk. The proposed methodology combines normalised electrochemical indicators with a weighted deterioration model and sensitivity analysis. For the baseline weighting system, the calculated ERI values decrease from 1.000 for the reference K0 condition to 0.846 for E1, 0.651 for E2, 0.374 for E3 and 0.000 for the highly aggressive E4 scenario. The most pronounced reliability reduction occurs between moderate electrical influence and simulated stray-current exposure. Sensitivity analysis confirms that the ranking  $K0 > E1 > E2 > E3 > E4$  remains unchanged under three weighting systems. The proposed framework is intended as a comparative engineering assessment tool rather than a substitute for detailed structural inspection or standardised corrosion diagnosis. Its principal contribution lies in integrating complementary electrochemical parameters into a unified reliability-oriented indicator that may support condition assessment, maintenance prioritisation and durability management of reinforced concrete structures exposed to complex electrical and chloride environments.*

**KEYWORDS:** REINFORCED CONCRETE; STRAY CURRENTS; REINFORCEMENT CORROSION; CHLORIDE EXPOSURE; ELECTRICAL RESISTIVITY; CORROSION CURRENT DENSITY; ELECTROCHEMICAL RELIABILITY; DURABILITY.

## 1 Page layout

Reinforced concrete structures are generally designed for long service lives; however, their durability and reliability may be significantly reduced by reinforcement corrosion. Corrosion leads to progressive loss of steel cross-section, deterioration of the steel-concrete bond, cracking and spalling of the concrete cover and, at advanced stages, reduction in load-bearing capacity and structural safety. Recent experimental investigations confirm that corrosion-related deterioration becomes particularly critical when reinforced concrete is exposed to combinations of cracking, aggressive ions and external electrical influences [1].

Among the environmental actions responsible for reinforcement depassivation, chloride ingress represents one of the most important durability threats. Once a sufficient concentration of chlorides reaches reinforcement level, the passive condition of embedded steel may be destabilised and localised corrosion may develop. The deterioration process becomes more complex in structures located near electrified railway systems, metro infrastructure and other direct-current installations, where leakage of electrical current from the intended return circuit may generate stray-current fields in surrounding soil and conductive construction materials [2]. Experimental studies have shown that stray-current corrosion differs from conventional constant direct-current acceleration and that the electrical characteristics of the current may influence both electrochemical reactions and chloride electromigration [2].

The interaction between stray electrical currents and chloride-contaminated environments is particularly important because the two actions may not operate independently. Investigations of concrete exposed to stray current have demonstrated that electrical effects can modify the transport behaviour of chloride ions and affect the interfacial transition zone between aggregate and cement matrix. Chen et al. observed changes in ITZ thickness and porosity under stray-current conditions and reported enhanced chloride transport through this microstructurally sensitive region [3]. These findings indicate that durability assessment of reinforced concrete structures located in electrically influenced environments should account not only for conventional diffusion processes but also for electrically induced ion migration and microstructural deterioration.

A further complication arises when cracks are present in the concrete cover. Cracks provide preferential transport paths for moisture and aggressive ions and simultaneously modify local electrical properties. Experimental and numerical research has demonstrated a pronounced coupling between cracking and stray-current exposure, leading to asymmetric distributions of electrical fields and ionic concentrations around reinforcement [1]. This behaviour illustrates the need for diagnostic methods capable of identifying deterioration before substantial structural damage becomes visible.

Electrochemical measurements provide an important basis for condition assessment. Reinforcement corrosion potential can be measured in accordance with ASTM C876-22b, which covers estimation of the electrical corrosion potential of uncoated reinforcing steel in field and laboratory concrete. However, potential measurements alone do not provide a complete structural diagnosis; complementary information such as corrosion rate, chloride content and environmental exposure conditions is often necessary [4]. This limitation is particularly relevant in the presence of stray currents, where externally induced electrical fields may affect individual electrochemical indicators.

Corrosion current density determined through polarisation-resistance measurements provides complementary information on instantaneous corrosion activity. RILEM TC 154-EMC recommendations relate polarisation resistance to corrosion current density and encourage interpretation together with corrosion potential, concrete resistivity and other exposure parameters [5]. Electrical resistivity of concrete is also important because it reflects the ability of the cementitious matrix to support ionic current flow. Low resistivity generally facilitates electrochemical current transmission, whereas higher resistivity may restrict corrosion kinetics. Nevertheless, resistivity is strongly influenced by moisture, temperature, pore structure and ionic concentration and should therefore be interpreted as part of a multi-parameter diagnostic framework.

The importance of controlled electrochemical monitoring is also reflected in international standards related to corrosion protection. ISO 12696:2022 specifies performance requirements for cathodic protection of steel embedded in cement-based concrete in new and existing structures and requires appropriate performance

\* Veis Šerifi: [serifiveis@np.ac.rs](mailto:serifiveis@np.ac.rs)

monitoring of protected systems [6]. Although the standard is focused on cathodic protection rather than stray-current diagnosis, it demonstrates the broader engineering importance of electrochemical monitoring when steel in concrete is exposed to electrically influenced environments.

Despite significant advances in electrochemical testing, assessment of reinforced concrete structures exposed to simultaneous stray-current and chloride effects remains challenging. Individual diagnostic parameters may provide different indications of structural condition because each represents a different component of the corrosion process. Corrosion potential primarily reflects the electrochemical state, resistivity characterises electrical and ionic conductivity of surrounding concrete, while corrosion current density provides information related to corrosion kinetics. Therefore, an integrated interpretation of these indicators is required for comparative reliability assessment.

Accordingly, the objective of the present study is to develop a multi-parameter methodology for evaluating the electrochemical reliability of reinforced concrete structures exposed to different levels of electrical and environmental influence. Five representative exposure scenarios are considered, ranging from a reference condition without significant electrical disturbance to a highly aggressive combined condition involving increased moisture, chlorides and simulated stray currents. The proposed methodology integrates reinforcement potential, concrete electrical resistivity and corrosion current density into a dimensionless Electrochemical Reliability Index (ERI). The ERI is introduced as an engineering research index for comparative analysis and sensitivity assessment; it is not proposed as a replacement for standardised corrosion diagnostic procedures.

## 2 Methodology

### 2.1 Research Framework and Definition of Exposure Scenarios

The proposed methodology was developed to evaluate the comparative electrochemical reliability of reinforced concrete structures subjected to different combinations of electrical and environmental actions. Five representative exposure scenarios were defined, ranging from a reference condition without significant electrical disturbance to a combined high-aggressiveness scenario involving increased moisture, chloride contamination and simulated stray-current influence.

**Table 1.** Definition of the investigated exposure scenarios

| Group | Exposure conditions                                                   | Principal purpose                                                    |
|-------|-----------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| K0    | Reference condition without significant external electrical influence | Definition of baseline electrochemical behaviour                     |
| E1    | Low-level electrical influence                                        | Assessment of minor electrical disturbance                           |
| E2    | Moderate electrical influence                                         | Simulation of prolonged operating conditions                         |
| E3    | Simulated stray-current exposure                                      | Assessment of electrically accelerated electrochemical deterioration |
| E4    | Increased moisture + chlorides + simulated stray currents             | Assessment of the most aggressive combined exposure scenario         |

The K0 group represents the reference state of reinforced concrete under conditions in which reinforcement remains predominantly protected by the alkaline concrete environment and no significant

externally imposed electrical disturbance is considered. The E1 and E2 groups represent progressively increasing electrical influence. The E3 group represents simulated stray-current exposure, while E4 combines stray currents with increased moisture and chloride presence. The adopted sequence of expected exposure severity is  $K0 < E1 < E2 < E3 < E4$ .

### 2.2 Selected Electrochemical Parameters

Three complementary parameters were selected for the reliability assessment: reinforcement corrosion potential,  $E_{corr}$  [mV]; electrical resistivity of concrete,  $\rho$  [k $\Omega$ ·cm]; and corrosion current density,  $i_{corr}$  [ $\mu$ A/cm<sup>2</sup>]. Corrosion potential provides information related to electrochemical state, resistivity characterises the capacity of the surrounding cementitious matrix to conduct ionic current, and corrosion current density represents the kinetic component of electrochemical deterioration. The central hypothesis is that a combined interpretation provides a more reliable comparative description than any single indicator considered independently.

### 2.3. Normalisation of the Electrochemical Parameters

Because the selected indicators are expressed in different physical units and their unfavourable directions differ, each parameter is transformed into a dimensionless deterioration indicator between 0 and 1. A value of 0 represents the most favourable condition within the analysed dataset, while 1 represents the least favourable condition.

$$R_E = (E_{\max} - E_i) / (E_{\max} - E_{\min}) \quad (1)$$

$$R_p = (\rho_{\max} - \rho_i) / (\rho_{\max} - \rho_{\min}) \quad (2)$$

$$R_i = (i_{\text{corr},i} - i_{\text{corr},\min}) / (i_{\text{corr},\max} - i_{\text{corr},\min}) \quad (3)$$

This study-specific normalisation is intended for comparative analysis of the investigated scenarios and does not replace standardised corrosion-potential, resistivity or corrosion-rate criteria.

### 2.4 Electrochemical Deterioration Index and Electrochemical Reliability Index

The three normalised parameters are integrated into an Electrochemical Deterioration Index (EDI). The general formulation is a weighted linear combination, where the weighting factors sum to unity.

$$EDI = w_E R_E + w_p R_p + w_i R_i \quad (4)$$

$$w_E + w_p + w_i = 1 \quad (5)$$

For the baseline model, the weighting coefficients are set to  $w_E = 0.30$ ,  $w_p = 0.25$  and  $w_i = 0.45$ . A somewhat greater weight is assigned to corrosion current density because it is used as the principal kinetic indicator of ongoing corrosion activity, whereas potential and resistivity provide complementary information. These weighting factors are author-proposed modelling assumptions and are subsequently examined through sensitivity analysis.

$$EDI = 0.30 R_E + 0.25 R_p + 0.45 R_i \quad (6)$$

$$ERI = 1 - EDI \quad (7)$$

$$ERI = 1 - (0.30 R_E + 0.25 R_p + 0.45 R_i) \quad (8)$$

The Electrochemical Reliability Index therefore varies theoretically from 0 to 1. Values approaching 1 indicate comparatively favourable electrochemical reliability, whereas values approaching 0 indicate severe electrochemical deterioration within the investigated comparative framework.

## 2.5 Proposed Reliability Classification

**Table 2.** Study-specific comparative classification of ERI values

| ERI range                        | Reliability class | Interpretation                                                       |
|----------------------------------|-------------------|----------------------------------------------------------------------|
| $0.80 \leq \text{ERI} \leq 1.00$ | Very high         | Favourable electrochemical condition                                 |
| $0.60 \leq \text{ERI} < 0.80$    | High              | Generally favourable condition with limited deterioration indicators |
| $0.40 \leq \text{ERI} < 0.60$    | Moderate          | Transitional condition requiring increased attention                 |
| $0.20 \leq \text{ERI} < 0.40$    | Low               | Significant electrochemical deterioration risk                       |
| $0.00 \leq \text{ERI} < 0.20$    | Very low          | Severe or critical comparative electrochemical condition             |

These limits are introduced exclusively for internal comparative interpretation of the proposed model. They do not represent standardised acceptance limits and should not be used independently to declare an existing structure safe or unsafe. The proposed classes represent model-based comparative categories and must not be interpreted as validated diagnostic or structural-safety thresholds.

## 2.6 Sensitivity Analysis of Weighting Factors

Because the weighting factors influence the final ERI value, a sensitivity analysis is included. Three weighting scenarios are considered: the baseline model, an approximately equal-weighting model and a corrosion-current-oriented model.

**Table 3.** Weighting scenarios for ERI sensitivity analysis

| Scenario | $w_E$ | $w_\rho$ | $w_i$ | Interpretation                   |
|----------|-------|----------|-------|----------------------------------|
| W1       | 0.30  | 0.25     | 0.45  | Baseline model                   |
| W2       | 0.333 | 0.333    | 0.334 | Approximately equal weighting    |
| W3       | 0.20  | 0.20     | 0.60  | Corrosion-current-oriented model |

$$\Delta \text{ERI} = \text{ERI}_{\max} - \text{ERI}_{\min} \quad (9)$$

A small  $\Delta \text{ERI}$  indicates that the classification is relatively insensitive to the adopted weighting system, whereas a large value indicates stronger dependence on the selected weights. Particular attention is given to whether the scenario ranking  $K0 > E1 > E2 > E3 > E4$  remains stable.

## 2.7 Evaluation of Conflicting Diagnostic Indicators

One advantage of the proposed multi-parameter model is its ability to address situations in which individual electrochemical indicators do not provide identical assessments. A structure may exhibit relatively negative reinforcement potential and moderate resistivity but low corrosion current density, or conversely, moderate potential together with low resistivity and elevated corrosion current density. The ERI therefore integrates electrochemical state, concrete conductivity and corrosion kinetics within a single comparative framework.

## 2.8 Statistical and Numerical Analysis

For future experimental implementation, each exposure condition should be represented by multiple specimens and the electrochemical parameters should be reported using mean values, standard deviations and coefficients of variation. In the present parametric numerical study, each exposure group is represented by a characteristic mean-state vector containing corrosion potential, resistivity and corrosion current density.

$$\text{CV} = (\text{SD} / \bar{X}) \times 100 \quad (10)$$

$$X_j = [E_{\text{corr},j}, \rho_j, i_{\text{corr},j}] \quad (11)$$

## 3 Results and Discussion

### 3.1 Parametric Electrochemical Response of the Exposure Groups

To evaluate the proposed Electrochemical Reliability Index, a representative parametric dataset was defined for the five exposure scenarios. The selected values describe a progressive transition from a favourable reference condition to a highly aggressive combined chloride-moisture-stray-current environment. The values represent a parametric numerical scenario and not experimentally measured data from a specific structure.

**Table 4.** Parametric electrochemical characteristics of the investigated exposure scenarios

| Group | $E_{\text{corr}}$ (mV) | $\rho$ ( $\text{k}\Omega \cdot \text{cm}$ ) | $i_{\text{corr}}$ ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ) |
|-------|------------------------|---------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| K0    | -145                   | 24.8                                        | 0.08                                            |
| E1    | -205                   | 18.5                                        | 0.18                                            |
| E2    | -285                   | 12.8                                        | 0.42                                            |
| E3    | -365                   | 7.4                                         | 1.10                                            |
| E4    | -455                   | 4.2                                         | 2.35                                            |

The adopted dataset indicates systematic deterioration of electrochemical conditions with increasing exposure severity. Corrosion potential becomes progressively more negative, concrete electrical resistivity decreases and corrosion current density increases from  $0.08 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  for K0 to  $2.35 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  for E4. This simultaneous evolution represents a transition from comparatively stable electrochemical conditions toward an increasingly active deterioration state.

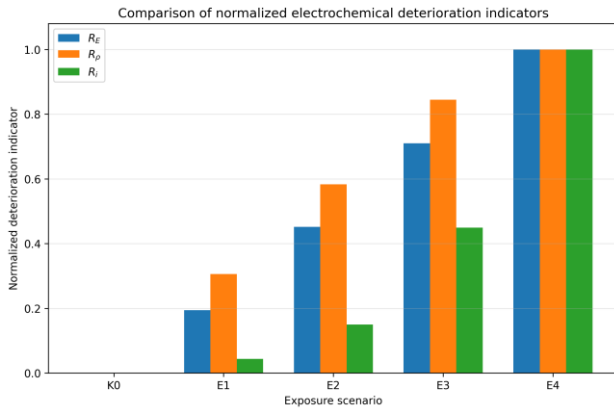
The adopted values were selected within representative ranges reported in electrochemical corrosion literature and were arranged to form an internally consistent parametric progression from passive or low-activity conditions to highly active corrosion conditions.

### 3.2 Normalised Electrochemical Deterioration Parameters

**Table 5.** Normalised deterioration indicators

| Group | $R_E$ | $R_\rho$ | $R_i$ |
|-------|-------|----------|-------|
| K0    | 0.000 | 0.000    | 0.000 |
| E1    | 0.194 | 0.306    | 0.044 |
| E2    | 0.452 | 0.583    | 0.150 |
| E3    | 0.710 | 0.845    | 0.449 |
| E4    | 1.000 | 1.000    | 1.000 |

The deterioration components do not develop at identical rates. In E2, for example,  $R_E = 0.452$  and  $R_p = 0.583$ , whereas  $R_i = 0.150$ . Thus, potential and resistivity already indicate substantial deterioration relative to the analysed range, while corrosion current density remains comparatively less developed. This is precisely the type of situation for which a multi-parameter model is useful.



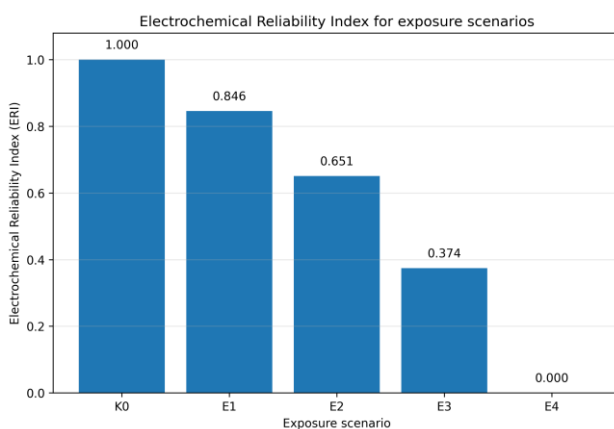
**Figure 1.** Comparison of normalised electrochemical deterioration indicators for K0-E4.

### 3.3 Electrochemical Deterioration Index and Reliability Index

**Table 6.** Calculated EDI and ERI values for the baseline weighting model

| Group | EDI   | ERI   | Proposed reliability class |
|-------|-------|-------|----------------------------|
| K0    | 0.000 | 1.000 | Very high                  |
| E1    | 0.154 | 0.846 | Very high                  |
| E2    | 0.349 | 0.651 | High                       |
| E3    | 0.626 | 0.374 | Low                        |
| E4    | 1.000 | 0.000 | Very low                   |

The ERI decreases systematically with increasing exposure severity: 1.000, 0.846, 0.651, 0.374 and 0.000 for K0 through E4, respectively. The ranking is therefore  $K0 > E1 > E2 > E3 > E4$ . The value  $ERI = 0.000$  for E4 should not be interpreted as a literal probability of structural failure; it represents the lowest comparative electrochemical reliability state within the normalised dataset.



**Figure 2.** Electrochemical Reliability Index for the investigated exposure scenarios.

### 3.4 Influence of Stray Currents on Electrochemical Reliability

Comparison between E2 and E3 provides an indication of the contribution of simulated stray-current exposure. Corrosion current density increases from 0.42 to 1.10  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ , corresponding to approximately 162%, while electrical resistivity decreases from 12.8 to 7.4  $\text{k}\Omega\cdot\text{cm}$  and corrosion potential shifts from -285 to -365 mV. The combined effect reduces ERI from 0.651 to 0.374, corresponding to a decrease of approximately 42.6% relative to E2. Within the proposed framework, stray-current exposure therefore represents a decisive transition from moderate electrochemical disturbance to significant deterioration risk.

### 3.5 Combined Influence of Moisture, Chlorides and Stray Currents

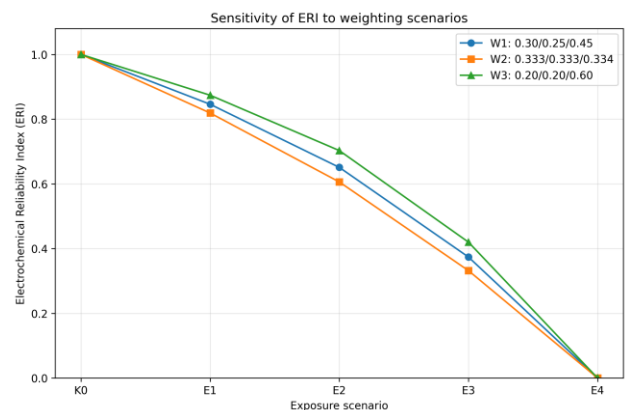
The E4 scenario represents simultaneous increased moisture, chloride contamination and stray-current influence. Compared with E3, corrosion current density rises from 1.10 to 2.35  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ , resistivity decreases from 7.4 to 4.2  $\text{k}\Omega\cdot\text{cm}$  and potential shifts to -455 mV. The parametric results suggest that combined exposure produces substantially more severe electrochemical deterioration than stray-current exposure considered without the most aggressive environmental combination. From an engineering perspective, this combined condition should be regarded as particularly critical in reinforced concrete structures located near electrically influenced infrastructure.

### 3.6 Sensitivity Analysis of the Weighting Factors

**Table 7.** ERI values under different weighting scenarios

| Group | ERI-W1 | ERI-W2 | ERI-W3 | $\Delta$ ERI |
|-------|--------|--------|--------|--------------|
| K0    | 1.000  | 1.000  | 1.000  | 0.000        |
| E1    | 0.846  | 0.819  | 0.874  | 0.055        |
| E2    | 0.651  | 0.606  | 0.703  | 0.098        |
| E3    | 0.374  | 0.332  | 0.420  | 0.087        |
| E4    | 0.000  | 0.000  | 0.000  | 0.000        |

The most important result of the sensitivity analysis is that the ranking  $K0 > E1 > E2 > E3 > E4$  remains unchanged for all three weighting systems. The greatest variation is obtained for E2, followed by E3, indicating that transitional exposure scenarios are more sensitive to weighting assumptions than the extreme states. Although the weights influence the magnitude of ERI, the overall comparative trend remains stable within the investigated scenario.



**Figure 3.** Sensitivity of ERI to the adopted weighting scenarios.

### 3.7 Identification of the Most Pronounced Modelled Transition

The most pronounced reliability reduction occurs between E2 and E3, where ERI decreases from 0.651 to 0.374. This identifies the



most pronounced transition within the adopted parametric scenario associated with simulated stray-current exposure. From a maintenance-management perspective, structures whose combined indicators place them near this transition may be priority candidates for more detailed investigation before severe corrosion propagation, cracking or cover spalling develop.

### 3.8 Multi-Parameter Versus Single-Parameter Assessment

The results demonstrate why a single electrochemical indicator may be insufficient. In E2, the normalised resistivity indicator suggests more pronounced deterioration than the corrosion-current indicator. If only one parameter were considered, the same condition could be classified very differently. By integrating all three indicators,  $ERI = 0.651$  provides a balanced comparative assessment. The advantage of the proposed approach is therefore greatest in transitional conditions where individual parameters do not evolve synchronously.

### 3.9 Engineering Implications

The proposed ERI framework may support condition screening, risk classification, inspection prioritisation and maintenance planning. A high ERI would generally be associated with routine monitoring, whereas a substantial reduction in ERI could justify detailed electrochemical and structural investigation. ERI should not be interpreted independently as a structural safety index because structural reliability is ultimately influenced by reinforcement loss, cracking, bond degradation, geometry, material properties and applied loads. The proposed model is therefore best regarded as an electrochemical screening and comparative decision-support tool.

## 4 Conclusions

This study proposed a multi-parameter framework for the comparative assessment of electrochemical reliability of reinforced concrete structures exposed to different levels of electrical and environmental influence. Based on the adopted parametric dataset and numerical framework, the following conclusions can be drawn:

1. Increasing electrical and environmental aggressiveness produced a consistent deterioration of all analysed electrochemical parameters. Reinforcement potential became progressively more negative, electrical resistivity decreased and corrosion current density increased from the reference K0 condition toward the combined E4 scenario.
2. The proposed ERI successfully distinguished all five exposure scenarios. For the baseline weighting model, the calculated ERI values were 1.000 for K0, 0.846 for E1, 0.651 for E2, 0.374 for E3 and 0.000 for E4.
3. The transition from moderate electrical influence to simulated stray-current exposure represented the most pronounced reduction in comparative electrochemical reliability. The ERI decreased from 0.651 in E2 to 0.374 in E3, indicating that stray-current influence may represent a critical deterioration mechanism within the adopted parametric framework.
4. The combined action of moisture, chlorides and stray currents produced the least favourable electrochemical condition. The E4 scenario simultaneously exhibited the most negative reinforcement potential, the lowest concrete resistivity and the highest corrosion current density within the investigated dataset.
5. The multi-parameter approach demonstrated an important advantage over single-parameter assessment. In transitional scenarios such as E2, corrosion potential, resistivity and corrosion current density did not indicate identical deterioration severity. Their integration into ERI therefore provided a more balanced comparative interpretation.
6. Sensitivity analysis confirmed the stability of the exposure ranking. Although different weighting systems modified absolute ERI values, the ranking  $K0 > E1 > E2 > E3 > E4$  remained unchanged for all analysed weighting scenarios.

7. Intermediate exposure conditions were more sensitive to the adopted weighting system than the extreme scenarios. The highest ERI variation was observed for E2, followed by E3, demonstrating that the selection of weighting coefficients is particularly important when individual indicators provide partially conflicting indications.

8. The proposed ERI should be interpreted as an electrochemical screening and comparative decision-support tool rather than as a direct structural safety index. It does not replace detailed structural inspection, chloride-content analysis, crack assessment, reinforcement-loss measurements or verification of load-bearing capacity.

The principal scientific contribution of the study is the development of an integrated framework that combines three complementary electrochemical indicators into a unified dimensionless reliability-oriented parameter. The model additionally incorporates sensitivity analysis of weighting coefficients, allowing the robustness of the final ranking to be evaluated.

A major limitation is that the analysed values represent a parametrically defined numerical scenario rather than experimentally measured data from a specific reinforced concrete structure. The proposed ERI classification limits and weighting coefficients should therefore be regarded as preliminary research assumptions requiring experimental validation.

Future research should include controlled laboratory exposure of reinforced concrete specimens to different levels of direct-current and stray-current influence, both with and without chloride contamination. Repeated measurements of reinforcement potential, concrete resistivity and corrosion current density should be combined with gravimetric reinforcement mass loss, chloride profiles, crack development and microstructural analysis. Such experimental data would enable calibration of the weighting coefficients and validation of the proposed ERI model for practical condition assessment and maintenance prioritisation.

Until experimental calibration is completed, the proposed ERI should be interpreted exclusively as a relative model-based electrochemical condition indicator.

## References

1. Chen, Q., Zhang, Q., Zhu, T., Li, B., Liu, W., Yang, H., Xu, J., Jiang, Z., & Zhu, H. (2024). Coupling effect of concrete cracks and stray current on chloride-induced corrosion of rebar. *Construction and Building Materials*, 449, 138403. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.138403>.
2. Liu, W., Xiao, J., Li, Y., Guo, Z., & Liu, H. (2025). Study on stray current corrosion behavior of rebars in cement mortar by XCT nondestructive testing method. *Construction and Building Materials*, 464, 140136. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.140136>.
3. Chen, Y.-Q., Chen, M.-Y., Chen, R.-P., & Kang, X. (2023). Stray current induced ITZ effect on chloride transport in concrete. *Construction and Building Materials*, 409, 133759. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133759>.
4. ASTM International. (2022). ASTM C876-22b: Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete. ASTM International, West Conshohocken, PA.
5. RILEM TC 154-EMC. Test methods for on-site corrosion rate measurement of steel reinforcement in concrete by means of the polarization resistance method. RILEM Recommendation.
6. International Organization for Standardization. (2022). ISO 12696:2022 - Cathodic protection of steel in concrete. ISO, Geneva.

# Количествената оценка на риска при българските пътни тунели – традиционен оценъчен модел спрямо моделите, базирани на вероятностно моделиране

## Quantitative Risk Assessment in Bulgarian Road Tunnels: Traditional Assessment Model vs. Probabilistic Modeling-Based Models

Евелина Иванова<sup>1</sup>, Стефан Крачунов<sup>2</sup>  
University of Architecture, Civil Engineering and Geodesy<sup>1</sup>  
University of Architecture, Civil Engineering and Geodesy<sup>2</sup>  
altera1979@abv.bg, stefankrachunov\_fte@uacg.bg

**Abstract:** Българската нормативна уредба предлага методика за оценка на риска в пътните тунели, която включва консервативни математически подходи. Теоретичната основа се ползва от числени модели, при които се отчитат приети конструктивни, проектни и организационни показатели, за които да се получи показател за потенциал на безопасност и коефициент на сигурност. В случая обхващането на влиянието на специфични пространствено-времеви фактори и въздействия върху водачите, които са с отношение върху пътната безопасност е частично и е сведено до приети константи. Публикацията разглежда традиционни оценъчни модели и количествено-вероятностните, които ползват симулативно моделиране в контекста на възможности за прецизиране на оценката на риска за пътната безопасност при българската тунелна инфраструктура.

**Keywords:** ОЦЕНКА НА РИСКА ПРИ ПЪТНИ ТУНЕЛИ, ПЪТНА БЕЗОПАСНОСТ, МОДЕЛИ И ПОДХОДИ ЗА АНАЛИЗ

### 1. Въведение

За оценка на риска при пътни тунели в международен план (извън националните) се използват редица методики, изградени в рамките на доклади, теоретични методики и софтуерни платформи. Основни разработчици са организации като Световната пътна асоциация (PIARC), Икономическата комисия за Европа на ООН (UNECE) и Международната тунелна асоциация (ITA) и други. За създаването им се използват възприети качествени инструменти за идентифициране на опасностите като:

- Международен стандарт IEC 61882 (транспониран у нас чрез БДС EN 61882:2016) [1]. Той е вид техническо ръководство за прилагане на методологията HAZOP (Hazard and Operability Study).

- Международен стандарт IEC 61025, който определя дедуктивния метод за анализ на надеждността и безопасността чрез „дървото на отказите“ (FTA – Fault Tree Analysis). Чрез него се търсят системните причини за единично събитие [2].

- Event Tree Analysis (ETA) или анализ на „дървото на събитията“, който ползва индуктивен метод за проследяване на развитието на единично инцидентно събитие през различни сценарии в зависимост от ефективността на системите за безопасност.

Независимо от това, какъв краен продукт се прилага в дадена държава, основните подходи са детерминистичен и вероятностен.

Детерминистичният подход има по-малка изчислителна тежест, защото използва единични променливи, за които дава консервативен краен резултат. При него не се търси вероятността за реализирането на получения изход.

Вероятностният подход използва групи от променливи, за които предоставя диапазон от разпределени резултати, за да покаже различни възможни изходи и техния шанс за настъпване. Изисква дигитални подходи за моделиране със софтуерно обезпечаване.

### 2. Методологии и инструменти за анализ - Европа

Всяка стандартна оценка на риска за тунелните съоръжения в Европа се прави с методики в три основни стъпки, за прилагания детерминистичен или вероятностен подход. Те са събиране на данни, избор на сценарийна основа и формат за моделиране на приетите сценарии, за да се получи потенциалът на рисковото събитие [3]. Основните стандарти, които се използват като базова рамка за нормирането в повечето европейски държави са:

- За страните членки на Европейския съюз е приета Директива 2004/54/ЕО на Европейския парламент. Тя дефинира минималните изисквания за безопасността на тунелите по трансевропейската пътна мрежа (TEN-T) [3]. Документът само предписва условията, при които трябва да се извършва анализ на риска, но не определя какъв вид методология трябва да се използва, като задължава всяка страна членка да разработи свой национален регламент. По този начин всяка държава използва подходи, които да предоставят инструменти за изчисляване (количествено определяне) на риска, които са съставени от предварително дефинирани опростени модели на сценарии за инциденти и/или допълвани с вероятностно моделиране.

- Моделът DG-QRAM е разработен съвместно от Световната пътна асоциация (PIARC) и Организацията за икономическо сътрудничество и развитие (OECD) [4]. Инициативата е от страна на комитета по пътни тунели на PIARC през 1995 г., като научната експертна група е включвала представители от 14 държави [4-7]. Специфичното за него е, че позволява сравнителен анализ между съоръжението и алтернативни открити пътни участъци, защото архитектурата на QRAM е насочена към намаляване на риска от опасни товари при тунели в експлоатация чрез използване на алтернативни маршрути. Моделът е валидиран с данни от реални тунели в Австрия, Франция, Нидерландия, Норвегия, Швеция и Швейцария [9]. Понеже е разписан за конкретни трасета и информацията за тях към момента на разработката, PIARC предупреждават, че DG-QRAM трябва да се използва в комбинация с други инструменти, за да се осигури постигане на изискваното общо ниво на безопасност при конкретното съоръжение [4], [10].

Въпреки посочените ограничения, методиката, на която се базира, е възприета практически в целия Европейски съюз по отношение на експлоатацията във връзка с превоза на опасни товари и пожарни въздействия при пътните тунели (категоризация по ADR [25]). Въпреки че основният анализен инструмент не разглежда събития с катастрофален характер извън тези, настъпили от опасни товари, методологията е заложила в основата на редица софтуерни реализации за пожарно въздействие и евакуационно поведение [8], [11].

### 3. Индивидуални методики – европейски опит

Предвид посоченото в [3, 4-11] всяка държава в Европа разработва своя специфична методическа постановка за оценка и прогнозиране на риска при пътните тунели. Водещи модели за изследване, които са се наложили като примери за детерминистични и вероятностни подходи са:

• **TuRisMo (Австрия)** – след оценка, съпоставяне и допълване на данните с чуждестранни източници, е дефиниран методическият подход, който е представен в национална наредба през 2008 г. Процедурата е създадена, за да отговаря на специфичните изисквания на австрийските пътни тунели. Тя е преработвана многократно, като по-съществени промени са направени в редакцията от 2015 г. Целта им е била да се обхване по-детайлно изследването на правоъгълни напречни сечения и сечения с повече от две ленти, както и включване на пожарни сценарии над 30 MW [12, 13]. Австрийският модел е детайлен количествено-вероятностен модел. Той съчетава математически апарат за анализ на „дървото на събитията“ (честотен анализ), комбиниран със статистика или симулации на последици от пожари и механични аварии. Стартира с инициращо събитие с известна честота, за което в рамките на няколко етапа се разгръщат възможните инцидентни пътища, водещи до различни възможни последици. Честотите на отделните сценарии се умножават по съответните стойности за размер на щетата, при което се получават частични рискове (статистически очакван брой загинали годишно за всеки тип събитие). Сборът по всички възможни инцидентни пътища дава стойността на очаквания риск за изследвания тунел. Факторите, влияещи върху честотата, се отчитат чрез изменение на относителните честоти в разклоненията [12].

• **QRA-tunnels и TUNPRIM (Нидерландия)** – методика, която е тясно насочена към характеристиките на нидерландските пътни тунели и практически е микромодел [11, 14-16]:

– TUNPRIM е създаден, за да се организира външната безопасност от шум, замърсяване на въздуха, пътен риск и други. Основният панел се развива в многофункционално направление с акцент върху рисковите фактори и в тунелите, като всяко вероятно събитие се изследва и моделира отделно [14].

– QRA-tunnels е стандарт, който първоначално е създаден като наричник за вероятностите за инциденти [15]. През 2013 г. сценарийният анализ е премахнат. Основното съображение за това е, че паралелното прилагане на количествен и сценариев анализ (без предварително нормирани допуски) създава условия за субективни тълкувания относно това дали е постигнато достатъчно ниво на безопасност, което е опасно за инженерната практика [16].

• **Étude Spécifique des Dangers (Франция)**. Френската методика за изследване на специфични опасности залага на детерминистичен подход и детайлно моделиране на евакуационните процеси при пожари и аварии от рискови товари. Структурата на изследване е развита в пет глави – преглед на тунела и средата му, функционално описание, идентификация на опасностите и избор на сценарии, изследването им и обобщение. Основният документ е насочен към оценка за всички тунели с дължина над 300 m по националната пътна мрежа на Франция. Развито в методическото ръководство Fascicule 4 на Френския национален център за изследване на тунели (CETU) – „Разследвания на специфични опасности“ през 2003 г.

За разлика от секторните и технически подходи, това е мултидисциплинарен процес, изрично базиран върху изследване на веригите от събития, които могат да доведат до най-тежките последици [17]. На практика детерминистичният анализ в методологията на „Специфично разследване на опасностите“ е модел на последиците, получен от избрани стандартизирани референтни сценарии, към които са отнесени изисквания за ниво на приемливост от средата. Процедурата е изградена, така че да търси най-негативния случай, който трябва да бъде осигурен, но за практиката CETU препоръчва да се следва приемлив риск, което изключва осигуряване на теоретичния най-критичен сценарий.

Френската система не е чисто детерминистична, вероятностната ѝ част съществува, но е обособена в отделен документ – Fascicule 3: „Сравнителни анализи на риска“, където се използва DG-QRAM. Специфичното изследване на

опасностите отчита решенията, взети на този предходен етап [17, 18].

• **Italian Risk Analysis Method (Италия)** – методът IRAM е разработен с методология, която се основава на анализ на риска с количествени и вероятностни критерии, като се търси съвкупна оценка между инфраструктурни, геотехнически и параметрите на трафика [19, 20]. Моделът работи с прилагане на теоремата на Бейс, която се ползва, за да се получи коригиране на първоначалните вероятности, след като се получат нови данни. Този модел третира вероятността като мярка за знание, която се доразвива с времето и това позволява надграждане в консервативните методики. Специфично за италианския стандарт е, че параметри, които влияят върху безопасността като геометрични характеристики на инфраструктурата и стандартни пътни произшествия не се използват при анализите [19-21].

#### 4. Концепция за безопасност и основни принципи за оценка на риска при българските тунели

Традиционно консервативните модели за оценка на риска се различават от симулативните и включват характеристики на тунела като облицовка, настилка, дължина, двупосочно движение, липса на осветление и други възможни, но на практика сложността на тунелните съоръжения като конструктивна и транспортна система, прави всеки тунел уникален. Следователно, за постигане на висока степен на точност, всяко съоръжение трябва да бъде анализирано в рамките на собствената си специфична експлоатационна конфигурация.

България е от държавите, които поради редица административни и наукометрични ограничения, възприема консервативния подход, като моделирането на динамични елементи на риска се заменя с опростени модели. Част от основанията са случайният характер на инцидентните събития, малката дължина на тунелните съоръжения и минималният брой регистрирани тежки инциденти. Към момента се приема, че нашата система е възприела австрийския подход и методологии за анализ на риска, които разчитат на статистически данни за чести събития (пътнотранспортни произшествия и пожари от превозни средства), без моделиране на по-рядко срещани аварийни ситуации, като големи тунелни пожари, аеродинамика на вентилацията, ефективност на експлоатационното оборудване и други.

Националните документи, чрез които се регламентира възприетият модел са [22, 23]. Наредбата [23] предоставя процедура за безопасност и рискови фактори, които да се проследяват на ниво проектиране на тунелните съоръжения. При проектирането на пътни тунели се спазват специфичните изисквания, заложили в нея, като те обхващат всичките им обслужващи системи, свързани с експлоатационните им параметри.

Българските стандарти посочват изисквания, с които да се осигури определено ниво на качество на движението, безопасност и ефективност при приети условия на околната среда. Основният сценарий, който се използва, е насочен към ограничаване на потенциала на щетите, които може да се наблюдават при пътнотранспортно произшествие, пожар на тежкотоварен и лек автомобил и други. За целта се използва консервативна система за оценка на риска, която обработва базови параметри на пътният тунел, повлияващи безопасността. Такива са дължината на тунела, броят на тръбите, брой на пътните ленти, широчина им, геометрия на напречното сечение на тунела, ситуация и надлъжен профил на трасето, вид на конструкцията, характер на движението (еднопосочно или двупосочно), интензивност (за всяка тръба, включително разпределението ѝ във времето) и други. По отношение на параметрите на трафика се отчитат характеристики като вероятност за всекидневно или сезонно претоварване, дял на

тежкотоварните автомобили, статистика за автомобилите, превозващи опасни товари.

От елементите за противодействие на рисково събитие се вземат предвид наличието на подземни пътища за достъп до тунела, разстояния между аварийните изходи, необходимо време за реакция на основните съставни части на единната спасителна система, характеристики на пътищата за достъп, аспекти, свързани със скоростта на движение, географски и метеорологични условия, проектно управление на трафика. Тук влизат и организационно-координационните мерки, които произтичат от системи за защита при бедствия и аварии, нивото на поддръжката и качество на обслужването, степента на мониторинга с обработване и докладване на информацията от него, модернизацията на оборудването, нивото и надеждност на вентилиране и осветяване в тунела, наличието и състоянието на интелигентните системи за управление на трафика.

В [22] основните характеристики, по които тунелите се класифицират в зависимост от опасностите в тях, са дължината на тунела, интензивността и посоката на движение в него. Моделът на оценка използва аналитично-консервативен подход, при който рискът трябва да бъде оценен при първоначално отнасяне на тунела в един от предварително приетите за гранични класове съоръжения. Минималният обхват на оценката във фазите на проектирането и в експлоатацията е даден в приложение № 3 на [22, 23].

В [24] е приложена теоретичната основа за оценка за безопасност на пътни тунели с числени моделни анализи. Обекти са били българските тунели „Витиня“ (1195 m) и „Траянова врата“ (685 m), а основни характеристики за опасностите в тунелите са брой на тунелните тръби, дължина на тунела, интензивност и посоката на движение. Анализът на риска е направен с приемане на сценарий за оценка на последиците (загубите) при емпирични стойности за честотата от представителни статистически данни за пътнотранспортни произшествия и аварии в тунели. С този приет подход авторът е дефинирал източниците на опасности и определил количествено риска. За да получи количествени измерители на безопасността са изчислени „потенциалът на безопасността“, „рисковия потенциал“, „коефициента на потенциалната опасност“, „коефициента на сигурност“ [24]. Потенциалът на безопасност е получен като сума на числено представяне на показатели, обобщени в осем категории. Всеки показател е точкуван, съобразно приложния традиционен подход. За всеки критерий се проследява наличието на всички конструктивни и организационни показатели в представените категории, зададени от българските нормативни документи [22]. Другите елементи, които са разгледани, са рисковият потенциал на тунела (показва възможността за възникване на произшествия и възможния обхват) и показателят за потенциалната опасност. Показателят за потенциална опасност е свързан с класа на опасност на съоръжението [22, 23].

Както вече беше посочено, численият подход за оценката на безопасността е приложен за ограничен брой параметри, които включват елементи на тунелната конструкция и налични технически параметри, които са оценени чрез качествени, полуколичествени и количествени (вероятностни) методи за етапа на експлоатация. Резултатите, които са представени, са в съответствие с възприетата у нас методология. Те осигуряват възможност за сравнение със съществуващи критерии за допустимост и теоретично предоставят възможност да се приоритизират и степенуват рискови фактори.

Получените резултати в [24] илюстрират предимствата и недостатъците на традиционните модели. Видимо е, че те са с опростена приложимост и може да се ползват за базова оценка относно приемливостта на потенциалните заплахи, включително релевантни към пътната безопасност. Представените резултати могат да се ползват за основа за избор на различни алтернативи за елиминиране, избягване или намаляване на мащаба на последиците в тунелите, като задават върхови стойности (минимални или максимални) на осигурителните мерки. Това означава, че системата ще

дефинира, мерките да бъдат изпълнени със силно занижен или значително преосигурен проектен капацитет.

## 5. Сравнение по основни показатели на разгледаните европейски модели за оценка на риска при пътни тунели

### • Сходно параметризиране за различните модели

Всички разгледани методики (DG-QRAM, TuRisMo, QRA-tunnels, Specific Hazard Investigation и IRAM) използват общи допускания като:

- Входни параметри на инфраструктурата (дължина на тунела, брой тунелни тръби, брой ленти, надлъжен наклон и тип на вентилационната система и други).

- Трафикови показатели (среднодневен или годишен трафик, процентно съдържание на тежкотоварни автомобили, средна скорост и други).

- Избран сценарий за развитие на пожари с оценка на топлинната мощност в MW, приети или моделирани диапазони. При всички методики по този критерий се посочват редица затруднения за избора на подход, който да обезпечи моделирането на тунелна вентилация, пожарно въздействие с отчитане на трафика и евакуацията [26, 27].

- Възможно отчитане на човешкия фактор при кризисни ситуации.

### • Европейските методологии и българският подход

В българската нормативна база поради липсата на статистика и изследвания се е търсил максимално негативен сценарий, който да бъде осигурен с технически и организационни мерки. Това разсъждение е наложило да се подходи към консервативни стойности и да се избере методика, която е структурно близка до австрийския модел TuRisMo. В използваната модификация са запазени основите на моделите за анализ. Общ е и подходът, с който се категоризират опасностите. Това означава, че и базовите показатели, определящи степента на обществения риск (честота на събитията и анализ на последиците), дефиниране на проектния пожар и допуските за поведенческите реакции (сходни времеви прозорци на отложената реакция) са сравними.

За нуждите на методологията, необходимият количествено-вероятностен подход е дефиниран в националните ни наредби. В тях е заложено, че ще използва одобрена методика, която се основава на опростен константен анализ с или без фиксирани коефициенти. За практиката това означава, че българските проектанти трябва да разчитат на симулациите от софтуера на QRAM или този на Австрия, за да се изпълнят трите основни стъпки на методиката.

От друга страна, липсата на разработен национален софтуер за симулации не само затруднява модернизиранието на приетите модели, но и изключва възможността за допълнително динамично моделиране и включване на количествено-вероятностни параметри, които може да имат отношение към безопасността и степента на риска.

## 6. Характеристики на анализа при консервативните модели във връзка с пътната безопасност

- **Потенциал за преоразмеряване на капацитета и финансова неефективност.** Залагането на най-лошия възможен сценарий, което е характерно за традиционните консервативни подходи за оценка на редица рискови фактори, може да доведе до преоразмеряване въз основа на екстремните стойности на последиците. Например приемането на пожар от 100 MW мощност, без допълнително моделиране чрез изчислителна механика на флуидите (CFD) за тунела може да наложи проектиране на вентилаторна система с максимални параметри, което ще се отрази върху напречното сечение и целия инвестиционен проект. Към тази група може да се включи и невъзможността на традиционните модели за постановки на повече от един случай на пожарно осигуряване,

защото само с аеродинамичен анализ на задимяването може да се отчете разликата при напълно и при частично работещи вентилатори.

• **Методологически несъответствия.** При внедряването на консервативни модели, които са изработени на база статистика от друга държава, е много вероятно, математическият модел да зададе рамка на резултатите, която не осигурява конкретната транспортна инфраструктура. Една от основните причини за това е, че поради сложността на системите на тунелните съоръжения, методиките за оценка на риска са създадени специално за нуждите на съответната държавна пътна мрежа. При липса на индивидуална оценка с прилагането на количествено-вероятностни подходи параметри като пожарно въздействие, осветеност, видимост и други изобщо няма да могат да бъдат обхванати, дори и да са залежали в методическата процедура.

• **Конструктивна осигуреност.** Традиционните методики за оценка не използват анализни модели, с които да се отчита термодинамичното поведение на облицовката като противопожарен отказ и на пътната настилка в качеството ѝ на горим материал, който отделя токсини и повишава общата топлинна мощност. Аналогично е разсъждениято за получаване на периода, в който може да се реализира термично разрушаване на облицовката или оборудването, което задава времевата рамка, с която разполагат спасителните екипи при аварии от типа на взрив, активен пожар или друга със сходен характер.

• **Реконструкция и модернизация на съществуващи тунели.** Липсата на моделиране на редица от рисковите фактори и прилагането на традиционна система за оценка с подход на осигуреност в граничните стойности може да доведе до невъзможност за обновяване на системите, които осигуряват добри експлоатационни показатели на тунелите (особено по скоростните пътища). Такива са осветление, вентилация, сигнализация, габарит, евакуационни елементи и други, защото голяма част от съществуващите съоръжения са проектирани и изпълнявани при стандарти, които не съответстват на съвременните изисквания за сигурност и пътна безопасност.

• **Недостатъчна оценка на геометрията, габарита и пространственото съчетание на параметрите.** Консервативните модели не използват времеви стъпки на проявление на дадено събитие, те работят само с крайни параметри на сценариите. Практиката показва, че именно пространствено-времевите симулации, използващи динамично свързани триизмерни инфраструктурни модели, могат да осигурят данни за използваемостта на съчетаните проектни параметри (ситуация и надлъжен профил, напречно сечение, брой ленти, брой тръби и клас на пътя и други). Същевременно липсата им прави невъзможно да се обхванат характерни промени при развитието на пожарни въздействия, висок е субективизмът по отношение на взаимодействието между водачите и проектните характеристики на тунелите и други. Например при случаите на пожар (особено при тунели над 500 m) не би могло да се оцени действителното влияние на дължината на тунела по отношение на охлаждането на горещата въздушна струя след сечението на активното горене. Друг проблем, който не може да бъде разгледан е, че при двупосочно движение рискът за хората от критично задимяване не е еднакъв за двете посоки и пътуващите се намират в различни евакуационни условия. Не е възможно да се установят елементи, които са свързани с оценката на пътната обстановка от водачите (релевантен пример е разгледан в [28]). Това особено важи при тунелни връзки със смесено ползване в урбанизирани територии.

• **Намален обхват на пътните одити за безопасност за българските тунели.** Липсата на допълваща информация от симулативни модели, изключва възможността да се разглежда в добра степен взаимодействието водач-съоръжение-пътна обстановка. Класическите модели включват човешкия фактор, разглеждайки водача като статичен субект с поведение в определена теоретична рамка. В действителност тунелната

среда предизвиква специфични психологически и физиологични феномени, които не трябва да се изключват като предпоставка за инцидент или по отношение на реакцията при вече настъпил такъв. Сред характерните ефекти, които консервативният подход пропуска, но могат да бъдат успешно симулирани (чрез софтуерни модели, базирани на резултати от изпитвания или симулатори) с цел отчитане на влиянието им върху шофьорите, са:

- Ефектът на „черната дупка“, която се наблюдава при навлизане в тунела. През деня човешкото око се нуждае от време за адаптация при преход от силна слънчева светлина към по-тъмна среда и ако този феномен не се отчита правилно, водачът практически не наблюдава пътната обстановка през няколкото секунди, които са необходими за адаптация [29 - 31].

- Ефектът на „бялата стена“, който се случва при излизане от тунела. Това е феномен, при който светлината в светлата част на денонощието при излизане от тунела заслепява водача. Това води до рязко свиване зениците или дори до пълна затваряне на очите, което забавя или изключва пространственото разпознаване на средата [29, 30, 31].

- При навлизане в тунел зрителното поле на шофьора се ограничава и се наблюдава „феномена на стесеното зрение“. Ограниченото пространство на напречното сечение и спецификата на затворена среда повлияват поведението на водачите, като ги насочват към придържане в близост до съседната лента на движение, фокусират се в собствената лента, намаляват усещането си за скоростта на пробег, влошава се преценката за дистанция до съседния автомобил и други [32 - 34].

- Токсикологично натоварване. При традиционните подходи не се анализира натоварването с токсични газове при пожарни въздействия и не се получават данни за влиянието на концентрациите на въглероден диоксид в купето на автомобила при стандартни условия. По този начин инженерната практика остава без научно знание за това дали и в каква степен тези емисии ще влошат способността на водачите за реакция, което може да повлияе върху пътната обстановка и в съчетание с другите параметри на съоръжението, обстановката и трафика да доведат до пътен инцидент.

## 7. Заключение и препоръки във връзка с оценка на риска и пътната безопасност при българската тунелна инфраструктура

### • Основни предимства на консервативните подходи:

Организационните предимства и лесното внедряване на процедурите в инвестиционния процес, които предоставят консервативните модели за оценка на риска при пътни тунели (включително възприетият в България) са съществено тяхно предимство. Това се дължи на разпознаваемите и еднозначни резултати, които лесно се съгласуват с държавни органи и се имплементират в национални наредби и стандарти.

Много положително се възприема и че оцеляващият им апарат използва математически модели, с които бързо се получава рамка на резултатите между входа и изхода на процедурата.

Основни слабости на традиционните модели за оценка на рисковите фактори при тунелната инфраструктура са ограничените възможности за проверка на ситуации с динамично развитие и малкото параметри, с които методическите им последователности работят.

Въпреки посоката на развитие на науката и инженерството в държави като нашата все още не се считат за недостатък високите нива на сигурност, които произтичат от този тип модели за проверяваните параметри. Като аргумент се изтъква, че за тунелната инфраструктура се е наложил принципът, че мероприятията, обезпечаващи параметри, близки до максималните за най-лошия сценарий, са оправдана инвестиция и това предпазва от инженерна грешка.

• **Основни предимства на количествено-вероятностните подходи:**



Проследяването на аварийните събития може да се извършва чрез динамични нелинейни анализи, което ще даде действителната картина на проявление на даден риск, заменяйки статичното му определяне като единична стойност чрез коефициенти на сигурност.

Тези подходи позволяват детайлен анализ на пространственото развитие на тунелното сечение като геометрия и в същото време предоставят възможност тунелът да бъде моделиран като триизмерно термодинамично пространство по отношение на разпространението на пожари, осветеността и други параметри.

По отношение на времевото развитие на инцидентите този тип модели могат да осигурят действителната времева рамка на нарастване и достигане на критичните моменти за хората, конструкцията и аварийно-спасителните дейности. Може да се симулира човешкото поведение на водачите, повлияни от редица въздействия и водещи до рискове за пътната безопасност в тунелното съоръжение (ASET/RSET баланс) [35].

Недостатък на методиките, базирани на софтуерни симулации, е рискът от субективна грешка при въвеждането на начално-граничните условия (т.нар. входна инженерна грешка). Ако проектантът заложи некоректни или твърде гранични начални параметри в софтуерния продукт, моделът ще даде неприемливи резултати за реалните условия.

Сериозен недостатък са високата сложност и цена на тези проучвания. Изискват се висококвалифицирани експерти и специфична научна компетентност. Високото ниво на експертиза е трудно за осигуряване кадрово, а и в глобален план завишава финансовата себестойност на крайния продукт.

Получените резултати трудно се съгласуват с държавните структури в България, защото те често не разполагат със специалисти, които да удостоверят получените резултати от софтуерни продукти, базирани на комплексни научни постановки. Въпреки това симулационният модел остава единственият наличен инструмент, който може да обвърже тези сложни физически и поведенчески събития в единна логическа последователност.

#### • Заключение:

Направеният аналитичен преглед ясно илюстрира, че консервативните модели и количествено-вероятностните подходи не трябва да се разглеждат като алтернативни, а следва да бъдат комбинирани в обща структурна система за управление на безопасността. Правилният инженерен подход изисква двата типа модели да се съвместяват като взаимно допълващи се елементи в рамките на глобален итерационен процес за анализ на риска. Той ще съчетава сигурността и административната яснота на консервативния подход с прецизността на динамично моделираните сценарии, което ще повиши качеството на инвестиционните проекти и ще повиши нивото на пътната безопасност в българската тунелна инфраструктура.

### 8. Благодарности

Авторите изказват благодарности за финансовата подкрепа на ЦНИП при УАСГ по проект Д-180.

### 9. Литература

1. БДС EN 61882:2016 Изследвания за опасност и функционалност, 19.09.2016 г.
2. <https://webstore.iec.ch/en/publication/4311>, посетен 07.2026.
3. <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2004/54/oj>, посетен 07.2026.
4. [https://www.piarc.org/en/PIARC-knowledge-base-Roads-and-Road-Transportation/Resilient-Road-Infrastructure/Road-Tunnels-Operations/gram\\_software](https://www.piarc.org/en/PIARC-knowledge-base-Roads-and-Road-Transportation/Resilient-Road-Infrastructure/Road-Tunnels-Operations/gram_software), посетен 07.2026 г.
5. OECD, Safety in Tunnels, Transport of dangerous goods through road tunnels, 2001.
6. Lacroix D., Cassini Ph., Hall R., Saccomanno Fr., Transport of dangerous goods through road tunnels: an integrated qra model developed under the joint oecd/piarc project ERS2, Paper presented at the International ESReDA Seminar, Oslo, 19-21 May 1999.

7. OECD/PIARC, User's Guide, Transport of Dangerous Goods through road tunnels: Quantitative Risk Assessment Model (v. 4.04), 2010.
8. Hall R., Knoflacher H., Pons P., Quantitative risk assessment model for dangerous goods transport through road tunnels, applications of the quantitative risk assessment model for dangerous goods transport in France, Austria and the UK., PIARC Ref.: RR329-086, Number of pages: 8, 2006.
9. Meng, Q., Qu, X. et al., Design and implementation of a quantitative risk assessment software tool for Singapore road tunnels, Expert Systems with Applications, Reference: XINN 101530, July 2026, DOI:<https://doi.org/10.1016/j.xinn.2026.101530>
10. <https://tunnelsmanual.piarc.org/en/safety-tools-safety-management/dg-transportrisk-assessment>, посетен 07.2026 г.
11. Petelin St., Luin B., Vidmar P., Risk Analysis Methodology for Road Tunnels and Alternative Routes, Strojniški vestnik, Journal of Mechanical Engineering 56 /2010 1, UDC 624.19, 41-51.
12. <https://www.tunnelriskmodel.at/about-turismo/background/>, посетен 07.2026 г.
13. Hörhan R., Forster C., Kohl B., RVS 09.03.11 – upgrading of the austrian tunnel risk model TuRisMo, 6thInternational Conference 'Tunnel Safety and Ventilation' 2012, Graz, 15-22.
14. <https://trid.trb.org/view/711140>, посетен 07.2026 г.
15. <https://open.rijkswaterstaat.nl/@140865/gebruikershandleidin-g-qra-tunnels-2-0/>, посетен 07.2026 г.
16. KPT, Duiding van de Nederlandse tunnelwetgeving, juni 2025
17. CET, Reference Pointq Guide to Road Tunnel Safety Documentation, Booklet 4, SSI, 09.2003.
18. <https://www.cetu.developpement-durable.gouv.fr/securite-a574.html?lang=fr>, посетен 07.2026 г.
19. <https://va.mite.gov.it/File/Documento/390338>, посетен 07.2026.
20. [https://www.fastigi.com/wp-content/uploads/2018/01/pdf\\_1294999703.pdf](https://www.fastigi.com/wp-content/uploads/2018/01/pdf_1294999703.pdf), посетен 07.2026.
21. [https://www.tirrenica.it/sites/default/files/2022-04/PE\\_DS\\_GN00\\_00\\_AR\\_001\\_A.pdf](https://www.tirrenica.it/sites/default/files/2022-04/PE_DS_GN00_00_AR_001_A.pdf), посетен 07.2026.
22. Наредба № РД-02-20-2 от 21 декември 2015 г. за технически правила и норми за проектиране на пътни тунели, ДВ. бр.8 от 29 януари 2016 г.
23. Наредба № 1 от 4.04.2007 г. за минималните изисквания за безопасност в тунели по републиканските пътища, които съвпадат с трансевропейската пътна мрежа на терит. на Р България, ДВ, бр. 58 от 2007 г.
24. Пашов, Н., Някои аспекти на безопасността при експлоатация на пътни тунели, X Юбилейна международна научни конференция „Проектиране и строителство на сгради и съоръжения“, 20-22 септември 2018 г, Варна, 282-290.
25. N. Vagiokas, A. Bletsas, R. M. L. Nelisse, Methodological approaches for tunnel classification according to ADR agreement, WTC 2013, 1-7.
26. Conrad Stacey, Michael Beyer, Critical of critical velocity – an industry practitioner's perspective 1, 10th International Conference 'Tunnel Safety and Ventilation' 2020, Graz; pre-print April 2020.
27. Greg Sanchez, One-dimensional critical velocity formulation – an assessment of the deficiency of the current models, and the introduction of a new concept, 12th International Conference 'Tunnel Safety and Ventilation' 2024, Graz, 358-366.
28. Hristov, B., Reinprecht, K., 2023. What dangers do e-scooter riders perceive in the urban environment? Are intersections more dangerous than driving freely on the road? VDI-Berichte, Vol. 2426, Pages 1-15, ISSN 0083-5560, ISBN 978-3-18-092426-7.
29. Changjiang Liu, Qiuping Wang, Simulating Human Visual Perception in Tunnel Portals, Sustainability 2021, 13(7), 3741; <https://doi.org/10.3390/su13073741>.
30. Guanfeng Yan, Mingnian Wang, Pengcheng Qin, Tao Yan, Yifan Bao, Xu Wang, Comparative study on drivers' eye movement characteristics and psycho-physiological reactions at tunnel entrances in plain and high-altitude areas: A pilot study, Tunnelling and Underground Space Technology, Volume 122, April 2022.
31. Yonggang Wang, Longjian Wang, Chen Wang, Yangdong Zhao, How eye movement and driving performance vary before, during, and after entering a long expressway tunnel: considering the

differences of novice and experienced drivers under daytime and nighttime conditions, 2016 Apr, doi: 10.1186/s40064-016-2148-y

32. <https://www.sintef.no/en/latest-news/2010/tunnel-vision/> , ,  
посетен 08.2026.

33. <https://smartdrivingacademy.ie/articles/tunnel-vision-speed-driving.html> , посетен 08.2026.

34. Shiming He, Zhigang Du, Lei Han, Shoushuo Wang, Ying Chen, Impact of urban tunnel sidewall effect on drivers: Examining visual characteristics and driving behavior across different lanes, 105476, Volume 143, January 2024, 10.1016/j.tust.2023.105476.

35. <https://fire-risk-assessment-network.com/blog/aset-rset/> ,  
посетен 08.2026.

# Example of a Model for Experimental Study on Carbon Dioxide Variation in the Passenger Compartment of a Motor Vehicle

Evelina Ivanova<sup>1</sup>, Stefan Krachunov<sup>2</sup>  
 University of Architecture, Civil Engineering and Geodesy<sup>1</sup>  
 University of Architecture, Civil Engineering and Geodesy<sup>2</sup>  
 altera1979@abv.bg, stefankrachunov\_fte@uacg.bg

**Abstract:** A characteristic feature of the Bulgarian climate sector is that during the summer months, under high temperature conditions, drivers operate vehicles in air recirculation mode to ensure improved cooling. The air recirculation mode in motor vehicle passenger compartments leads to an increase in CO<sub>2</sub>, and under this operation of the ventilation system, its concentration in the passenger compartment can rise rapidly. At the same time, research and data from epidemiological and toxicology studies show that high levels of CO<sub>2</sub> air pollution are associated with adverse effects on concentration and decision-making. This indicates that if the need to evaluate the impact of the gas increase on the mental and/or physiological state of drivers is analyzed, the results can be assessed in relation to road safety. This publication presents a conceptual model for an experimental study of carbon dioxide variation in a passenger compartment of a motor vehicle, so that its results can be used for the needs of such analyses.

**Keywords:** CARBON DIOXIDE CONCENTRATIONS, COGNITIVE DECLINE, ROAD SAFETY RISKS IN TRANSPORT FACILITIES

## 1. Анализ на актуалното състояние и предходен изследователски опит

### • Ефекти на антропогенни CO<sub>2</sub> емисии върху когнитивната функция в затворени пространства.

Изследвания, отнасящи се до изясняване на ефектите от CO<sub>2</sub> върху човешката физиология, consistently потвърждават, че високите концентрации на газа провокират изява на здравословни симптоми, понижават способността за концентрация и влошават общата работоспособност. Изследователите изграждат хипотеза, че повишената наситеност на въздуха с CO<sub>2</sub> в затворени пространства, без промени в скоростта на вентилацията, оказват вредно влияние върху вземането на решения и способността за стратегическо планиране на обитателите. В [15] обобщават, че краткосрочното излагане на умерено високи нива (в диапазона 1000-5000 ppm) предизвиква леки симптоми като умора, дискомфорт или главоболие, които рефлектират върху физиологичното и когнитивното състояние на индивида. Някои от тези ефекти включват изменение в мозъчната активност, индуциращо сънливост, повишаване на сърдечната честота и по-лоши когнитивни резултати при тестове, оценяващи фокусирането или способността за вземане на решения и други.

В [13] са обобщени литературни източници относно влиянието на CO<sub>2</sub> върху когнитивните функции в затворени пространства с различни нива на вентилация, като училища и офис сгради. Цитираните данни от експерименти в училищна среда показват пряко отрицателно въздействие върху резултатите от стандартизираните тестове, както и значително влошаване на вниманието, бдителността, паметта и концентрацията при повишени нива на газа. В същата разработка е приложен прогностичен модел „от край до край“, според който при прогнозиран нива от 930 ppm и липса на мерки за вентилация, може да се очаква ~25% спад на способността за вземане на основни решения на закрито и ~50% намаление на по-сложното стратегическо мислене. В обзора на [7] се позовават на предходни проучвания, при които е установено, че след преминаване на прага от 1000 ppm, способността за вземане на решения е силно засегната. За контролирана вътрешна среда някои автори определят диапазон, при който се наблюдават ефекти, между 2000 ppm и 5000 ppm. Като примерен тест за когнитивен спад се посочва влошаване на дейности като корекция на стандартизиран текст [2, 7]. Експерименталните данни в [3] проследяват девет основни фактора и комбинации, с които представят степените на производителност в контролирана вътрешна среда чрез три различни нива на концентрация на CO<sub>2</sub> - 600, 1000 и 2500 ppm. Според статистически получените резултати седем от показателите (основна дейност, ориентация към задачата, приложна дейност, инициативност, гъвкавост в подхода към задачата, използване на информация и основна стратегия) се

влошават при 2500 ppm. В същото време търсенето на информация и фокусираната дейност не са били осезаемо повлияни от нивата на изследваните ppm стойности. Тезата за когнитивния спад е разглеждана и в [16], където е възприето, че минималният праг за физиологично и когнитивно въздействие е 600 ppm (потвърдена тестово като гранична стойност, под която не са наблюдавани значителни отклонения в поведението). При средно високи концентрации в диапазона 1000 – 1500 ppm, от приети данни в предходни изследвания, се приема, че в затворени пространства се регистрира отслабване на умствената дейност. Най-последователните и статистически значими деструктивни негативни изменения във всички тествани области са докладвани при или над 2500 ppm. Следователно повишаване на CO<sub>2</sub> от 550 (600) ppm на стъпки през 1400 ppm до 2500 ppm може да се дефинира като референтен когнитивен диапазон за изследване. В рамките на този интервал са засегнати вземането на решения, стратегическото мислене и реакцията при кризисни ситуации. В същата публикация се прави препратка към транспорта, като се посочва, че по време на шофиране при продължителност на излагане (над 60 минути) в условията на ниски до средни граници под 1400 ppm, се нарушава способността за възприемане и реакция на водачите.

### • Ефекти на умерени концентрации на CO<sub>2</sub> в купето на превозно средство.

В [1] е публикувано изследване, отнасящо се до оценка на влиянието на емисиите от пресни и отработени газове от превозни средства върху дихателния режим и клетъчните реакции в човешкото тяло – пилотно проучване с единично превозно средство. Експериментът е провокиран от натрупаните до момента данни от епидемиологични и токсикологични проучвания, които показват, че високите нива на замърсяване на въздуха с частици са свързани с неблагоприятни последици за здравето. Отработените газове са комплекс от вредни компоненти като въглеродороди, въглероден оксид (CO), азотен оксид (NO), азотен диоксид (NO<sub>2</sub>), серен оксид (SO), серен диоксид (SO<sub>2</sub>), въглероден диоксид (CO<sub>2</sub>), летливи органични съединения, прахови частици и други [1, 7]. При задръствания, като решение за подобряване на тази среда, шофьорите традиционно включат режима на вътрешна рецикулация на климатичната система на автомобила [2, 7].

В [2] е посочена връзка между задръстванията и CO<sub>2</sub> в автомобилите. В направения анализ за българския климатичен сектор се допълва, че през летните месеци в условията на високи температури (често съчетани с висока влажност на въздуха), водачите шофират колите си в режим на рецикулация, за да осигурят ефективно охлаждане.

В [15] също се разглеждат случаите на превозни средства, движещи се със система отопление, вентилация и климатизация (HVAC) в режим на рецикулация (RC). Авторите подчертават, че този режим се използва за

намаляване на потока от атмосферни замърсители отвън (например при задръствания) и/или за максимизиране на ефектите на топлинна климатизация през летния период, като режимът на рециркулация на въздуха в купетата редуцира навлизането на  $O_2$ , но води до увеличаване на  $CO_2$ .

Съществена специфика при моторните превозни средства е бързото нарастване на концентрацията - увеличението е най-стръмно в условията на ограниченото пространство на купето. В такъв тип затворени пространства при рециркуляционен режим на вентилационната система, концентрацията на въглеродните емисии в автомобила може да се повиши бързо поради човешкия метаболизъм и издишване за сметка на концентрацията на кислород [4]. Експериментални данни в [2] показват, че за около 5 минути в режим на задръстване или рециркулация по други причини, при четирима пътуващи, концентрацията в купето на приетото еталонно моторно превозно средство се достигат нива на  $CO_2$  в порядъка на 2500 ppm. Според проучване, проведено от шведския производител на сензори Senseair, резултатите показват, че при 4 възрастни в един автомобил, нивата достигат 1000 ppm за 1,5 минути, 2500 ppm за 5 минути и 6000 ppm след 22 минути (дори с включена вентилация за свеж въздух) [14]. В същия източник се представя тест при контролна група от шофьор и трима пътници в неподвижен автомобил с изключен двигател. Автостъклата са били затворени, за да се избегне приток на свеж въздух вътре в превозното средство. При тези предпоставки, регистраторът на данни е показал, че когато пътниците са влезли в колата, нивото на  $CO_2$  е било 1000 ppm. След това то се е увеличило до почти 4000 ppm за 15 минути, при което се е влошил микроклиматът в кабината. Представено е и пътуване с кола с четирима души. Пробегът е непрекъснат от Уелс до Шотландия. При четирима пътуващи нивото на въглероден диоксид се е повишило по-значително, достигайки 2000 ppm за около двадесет минути.

В [15] обобщават, че различни проучвания са открили умерено високи нива (1000 – 5000 ppm) само след 5 до 10 минути шофиране, което е показател, че водачите много често са поставени в такива условия при пътуване. Ефектите върху шофирането са изследвани и в [17]. Изследователите представят експеримент със симулатор на шофиране с осем таксиметрови шофьори. Експериментът е проведен при условия на ниска концентрация на въглероден диоксид под 500 ppm и висока концентрация от 5000 ppm. За оценка на шофьорските качества и когнитивните функции са използвани три мерки: задача с два опита, задача за LED реакция и оценка на шофирането. Те основават изходната теза за проекта си на заключенията, че при концентрация на въглеродните емисии от 1000 ppm се наблюдава значително намаление на способността за вземане на решения и на симулации в офис среди, където са установени 21% спад в когнитивните резултати, когато нивата се повишават от 550 ppm до 1400 ppm, с демонстриране на изразени загуби в области като реакция при кризи, използване на информация и стратегическо мислене.

## **2. Цел и предпоставки за очаквани резултати от изследвания на фактори, повлияващи поведението на водачите на МПС**

Значимостта на психофизиологичния статус на водачите и елементите, които пряко могат да му повлияят, съставляват актуално направление за научни изследвания.

През последното десетилетие за осигуряване на пътната безопасност при транспортни съоръжения и по-специално в тунелните, тенденциите за създаване на модели за оценка на поведението (вкл. възможностите за психологическа реакция) на водачите, са водеща изследователска постановка. Глобалната цел е преоценяване на степента на значимост на психофизиологичното състояние на шофиращите за различни експлоатационни условия (съчетание между проектни параметри в ситуация и надлъжен профил, габарит на платното за движение, брой ленти, брой тръби за посока, елементи на

трафика, влияние на степен на осветеност, елементи на оповестителна система, вентилация и други) [9, 11, 12]. Провеждането на експерименти и анализи на получените от тях резултати ще дадат рамка, кои характеристики трябва да бъдат съобразявани, за да се подобрят нивата на пътна безопасност при оценка на риска. Такъв пример е показан в [11], където се препоръчва да се оценяват форми на поведение на водача, които може да са последици от реактивност на погледа през умствено натоварване, произтичащо от цветовете и качествата на осветлението на стените на тунелите. Експериментът включва субективно възприеманите преживявания на водачите, които могат да бъдат свързани със сънливост, възбуда, разсейване и чувство за безопасност и сигурност.

В същото време мостовите и особено тунелите предлагат специфична среда за шофиране, което е ограничение, довеждащо до непропорционалност между събитие и последици, т.е. малък инцидент в тунел може да доведе до тежки последици и висока вероятност за свързани вторични пътнотранспортни събития, а това ги прави критични в комбинация с липсата на интелигентни транспортни системи (ИТС) за контрол по време на експлоатация.

От направения обзор може да се заключи, че пътната безопасност при транспортни съоръжения трябва да бъде оценявана и одитирана с методики, разработени така, че да отчитат специфичните разлики (спрямо открития път) на система от вероятностни фактори, които въздействат върху риска и безопасността. В този контекст оценката трябва да се развива паралелно в две посоки:

- Отчитане на промененото въздействие и тежест на консервативните параметри като конструктивни и проектни характеристики на съоръжението, клас и състояние на пътя, параметри на трафика, експлоатационна обстановка и други.

- Проследяване на промените, които настъпват в психофизиологично състояние на водачите, предизвикано от фактори на средата вътре и извън превозното средство и търсене на влиянието им върху шофирането в среда с допълнителни ограничения в рамките на мостови и тунелни съоръжения. За такива се считат ефектите на „черната дупка“, която се наблюдава при навлизане в тунела, на „бялата стена“ при излизане от тунела [18 - 20] и „феномена на стесненото зрение“, което се дължи на ограничената среда [21 - 23]. Към тази група се причислява и токсикологично натоварване във връзка с корелацията между микроклимата в купето (концентрацията на  $CO_2$ ) и степента на когнитивния потенциал. В [7] е направен извод, основан на експериментални резултати от проведено изследване, че правилната оценка на механизмите на формиране на въздушния поток в работния обем на превозното средство може да повиши нивата на пътната безопасност. В [10] също се посочва връзката между тези показатели и се акцентира върху значимостта им за преценка на динамично променяща се среда.

В рамките на транспортни съоръжения (преимуществено в тунели и подземи, които са затворени пространства) влиянието на потенциално забавен транспортен поток (пълзене) или в ситуация на задръстване, вредното въздействие на завишаващите се нива на  $CO_2$  трябва да бъде контролирано. Това е норма, залегнала в международните стандарти за безопасност. В редица национални регламенти този проблем е решен с организационни експлоатационни мерки. Те основно използват интелигентни транспортни системи (ИТС), активиращи вентилационната система на тунела, когато се достигнат заложените за опасни нива на концентрации на токсичните вещества във въздуха [12]. В същото време водачите, за да подобрят микроклимата в купето, включват рециркулацията (RC) на автомобила и по този начин насищането с въглеродни емисии се повишава. Това е парадокс, който не е проучван и не се третира нормативно, защото до момента липсват и дефинирани ограничения за нивата на  $CO_2$  в автомобилите, въпреки че стандартът ASHRAE 62-2001 [6] предлага допустимо ниво от 1200-1300 ppm като препоръка за обема на купето (кабината) [2, 5, 6].

За държави като България, където основната част от транспортните съоръжения на скоростни пътища са проектирани с ограничени габаритни размери и форма на напречните сечения, които не позволяват интегрирането на обслужващи системи за сигурност, в съчетание с липсата на базови нормативни гранични стойности, де факто отсъства ниво на осигуреност за тунелните съоръжения. При тази изходна постановка, за да се направи аргументирана преценка за степента на рисково въздействие, трябва да се приложат оценъчни подходи, базирани на данни за психофизиологичния статус на шофиращите. За целта трябва да се натрупа информационна база от теоретични и експериментални изследвания. Техният анализ ще дефинира насоки до каква степен се влошават когнитивните способности на водачите за вземане на решения и възможностите им за реакцията спрямо пътната обстановка в рамките на съоръжението, което респективно да се оценяват като предпоставка за пътен инцидент.

Опитът и препоръките, представени в [15], също потвърждават, че с резултатите от научни изследвания за параметризиране на рискови елементи за водачите при пробег в рамките на транспортни съоръжения, ще се подобрят процедурите по управление и одитиране на пътната безопасност.

### **3. Концептуален подход за получаване на данни за нивото на CO<sub>2</sub> в купето на автомобил - цел, изследователски въпроси и предходен изследователски опит**

Моделът на планирания експеримент трябва да бъде изграден върху съществуваща научно-изследователска основа и технологична обезпеченост, което позволява интегрирането на международния опит в областта на науката и технологиите. Структурирането на експерименталната рамка обхваща обзор на релевантната литература, дефиниране на лимитирани входни задачи и анализ на подходящи експериментални постановки.

#### **Цел, изследователски въпроси и предходен изследователски опит.**

В [15] са формулирали хипотези, които могат да бъдат проучени и приложени към методологията за определяне за оценка на рисковото въздействие. Изследователите насочват вниманието си към факта, че експозицията на високи концентрации на CO<sub>2</sub> може да има умерени до тежки последици за човешкото здраве. Видът и интензитетът на тези ефекти зависят най-вече от достигнатите експлоатационни нива, както и от честотата и продължителността на излагане. Краткосрочното въздействие от екстремно високи стойности, между 50 000 и 100 000 ppm, може да повиши кръвното налягане и да предизвика замаяност, гадене или дори животозастрашаващи състояния, като хиперкапния или загуба на съзнание. За разлика от тях, краткосрочното излагане на умерено високи нива (1000-5000 ppm) обикновено провокира леки симптоми, засягащи благосъстоянието на обитателите, като субективни чувства на умора и дискомфорт или главоболие.

Ситуации с продължителни периоди на непрекъснат пробег са релевантни към редица обществени случаи, например при някои пътуващи до работа или професионални шофьори (напр. шофьори на камиони) и с много пътници вътре (напр. шофьори на автобуси). Като се има предвид, че сънливостта и умората, типични симптоми, предизвикани от CO<sub>2</sub>, са причина за 20% от всички пътнотранспортни произшествия (ПТП), е необходимо да се хвърли светлина върху ролята им в шофьорските качества и безопасността на движението [15].

Настоящото научно изследване е насочено към задачата да се определи ефектът, който умерените нива на газа (1500 и 3000 ppm, по-специално), често срещани в конвенционалните превозни средства, оказват върху психофизиологичното състояние и поведението на водачите. В рамките на тази цел,

по-специфична цел е била да се анализира възможното модулиращо влияние, което времето за шофиране и когнитивното натоварване на водачите оказват върху ефектите на CO<sub>2</sub>. Тя е била включена в анализа, за да се отговори на хипотезата, повдигната в литературата, че ефектите на CO<sub>2</sub> могат да станат очевидни или по-силни при по-дълги времена на експозиция и когато когнитивното натоварване е по-високо.

Авторите са използвали симулатор (шведски институт VTI). [15, 24]. Той е инсталиран в палатка с обем 24 m<sup>3</sup>, за да се регулират нивата на газа във вътрешната среда. Експериментът е проведен върху хетерогенна група от тридесет и двама здрави възрастни участници (средно на 41 години). Всеки участник е изпълнил две компютъризирани когнитивни задачи и е управлявал симулатора при нива от 700, 1500 и 3000 ppm.

Сценарият включвал трасе, което задава монотонно шофиране в продължение на 40 минути. На всеки 5 минути шофиерите били помолени да докладват устно нивото си на сънливост по възприета скала. В началото или в средата на всяко шофиране е зададена 20-минутна слухова задача, която да се изпълнява едновременно с шофирането. Целта ѝ е била да се увеличи когнитивното натоварване на участниците, за да се види неговото влияние върху ефектите на CO<sub>2</sub>. Сърдечната и очната им дейност са проследени чрез електроди, за да се анализира нивото им на бдителност по време на шофиране.

Изследователският екип достига до важни заключения, които приемаме за основни при избора на измервателен подход:

- Критична граница на проявление. Експозициите при 1500 ppm водят до най-силни ефекти върху субективното и физиологично състояние на нашите участници, както и върху тяхното представяне. По-конкретно, обективната и субективната сънливост са били по-високи, а страничният контрол на превозното средство по-лош (т.е. по-голяма странична вариабилност и повече пресичания на линията), в сравнение с другите условия.

- Динамика спрямо времето: Противно на първоначалните прогнози в литературата, ефектите от времето за шофиране не се изострят пропорционално от по-нататъшното повишаване на CO<sub>2</sub> до 3000 ppm [15].

Обосновка на изследването, за нуждите на концептуалния подход и идейното му структуриране. Изводите в [15] доказват, че за целите на сигурността не е достатъчно просто да се регистрират екстремни стойности. Необходим е модел, базиран на измервателна технология с висока чувствителност и алгоритъм, който отчита динамиката на натрупване във времето.

### **4. Идеен модел на експеримента за изследване на изменението на CO<sub>2</sub> в купето на МПС**

Въз основа на теоретичния анализ се дефинират два алтернативни и допълващи се модела за провеждане на експериментите:

- Симулаторен (безрисков) подход: провежда се в контролирана (защитена) среда чрез специализирани симулатори за шофиране (по аналогия с [15, 24]). Позволява пълно управление на факторите на средата и детайлно следене на субективните реакции.

- Полеви (рисков) подход: провежда се в реални експлоатационни пътни условия. Осигурява висока автентичност на данните, но възможностите за прецизно следене на физиологичните параметри са ограничени от редица външни фактори.

Изборът на изследователска методология при необходимост може да се ориентира към осигуряване на масиви от данни, подходящи за последващо разработване на предиктивни модели за оценка на риска (включително чрез алгоритми с изкуствен интелект).

Измерването в реално време на биометрични и когнитивни данни е подходящ контролен подход при безрисковите модели. Параметри като време за реакция (традиционно изследвано със



стандартизирани психомоторни тестове по време на шофиране), посока на погледа (фиксиране или скорост на мигане), измерване на сърдечен ритъм, кръвно налягане и други индикатори за умора и други, трудно може да бъдат приложени при полевите тестове. Основните причини за това са изискванията на апаратурата и рискът, че самата тя може да се превърне в предпоставка за пътен травматизъм.

**4.1. Динамика на измерването и прогнозен потенциал.** Важен елемент е, че избраният модел на експеримента трябва да позволява проследяване на нарастването на  $\text{CO}_2$ , за да се прогнозира неговото натрупване. За всеки тестов период се изчислява скоростта на изменение, отнесена към характеристиките на купето, броя на пътниците и параметрите на околната среда. Това ще даде възможност да се съставят прогнози за момента на настъпване на когнитивен спад у водача.

При провеждане на експериментите в защитена (симулаторна) среда анализът може да включва и допълнителна специфика – например индивидуални медицински показатели (включително чрез видеозаснемане) и други характеристики за персонализиране на профилите на водачите. В реални (полеви) условия обаче коректното им проследяване е ограничено от редица външни фактори.

**4.2. Формулиране на изследователската хипотеза и идентификация на променливите за валидиране на модела.**

Въз основа на литературен анализ [15, 17] може да се приеме, че редица групи водачи често са изложени на нива на  $\text{CO}_2$ , които биха могли да влошат способността им за безопасно управление. Съществува необходимост от допълнителни експериментални изследвания, които да определят количествено човешкия когнитивен отговор в широк спектър от условия. Това може да бъде прието за работна хипотеза при насищане с въглероден диоксид между 500 и 2500 ppm над определено време, върху която да се изработи оценка за потенциала за физиологична адаптация на организма.

Предварителното определяне на минимална продължителност на експеримента е ключова изходна променлива за моделиране на изследователските сценарии. Това условие е от съществено значение за тунелите, защото може да се попадне в хипотеза на несъответствие.

Например повишените нива на  $\text{CO}_2$  при рециркулация на въздуха и движение в тунели теоретично се считат за потенциален рисков фактор за водача. Ако обаче не се отчете предварителното насищане и времетраенето, в което той е шофирал в среда над 500 ppm и се изключи кумулативния ефект на натрупване, то дължината на тунела ще бъде водещ фактор за резултата.

Предвид факта, че натрупването на  $\text{CO}_2$  трябва да бъде регистрирано при по-продължителен пробег, а пътните тунели в България често са с ограничена дължина спрямо откритите пътни участъци, и при двата формата на експеримента се предвижда уводно пътуване с минимална продължителност от 45 минути.

В [17] се възприема времетраене на шофирането (включително в симулатор) от един астрономически час като подходящ период за провеждане на измерванията, свързани с когнитивното представяне на водачите. По този начин, преди навлизане в тунелното съоръжение, нивата на  $\text{CO}_2$  в купето вече ще са започнали да се покачват (ако рециркулацията е включена или има повече хора, или и двете), следователно може да се приеме, че шофьорът е достигнал състояние на „монотонно шофиране“, при което се очаква първично изчерпване на когнитивния капацитет.

**4.3. Експериментално полево изследване.**

Експериментът в реални условия трябва да бъде методически структуриран. Това включва алгоритъм за провеждане, дефиниране на минимални параметри на измервателната техника и специализиран софтуер за запис и обработка на данните и други.

Полевият експеримент е насочен към изграждане на подходяща тестова среда за оценка на риска, която да осигури

времева и логическа синхронизация на потоците от данни от различните измервателни устройства. Подходящи минимални изисквания към хардуерното осигуряване и измервателната апаратура по отношение на въглеродното натоварване може да бъдат:

- Измерване на въглеродния диоксид с подходящи газоанализатори или сензори, например на производителя Vaisala, които да удовлетворяват пакетите за анализ, като осигуряват измерване, при което нивата на ppm се записват при малка дължина на интервала от порядъка на секунди.

- Регистриране на външните фактори: паралелно се измерват параметрите на външната концентрация на  $\text{CO}_2$  в околната среда, влажност, температура и други.

- Хардуерната архитектура за измерване на  $\text{CO}_2$  е препоръчително да ползва недисперсивни инфрачервени датчици за газ, които измерват с висока точност по отношение на температурата и влажностната компенсация (NDIR технология). Технологиите за измерване трябва да позволява получаване на резултати за концентрацията на газа в реално време, динамиката на насищане, пиковите стойности, скоростта на изменение и да предлага възможност за последваща обработка на резултатите с алгоритми, основани на изкуствен интелект. За целта са подходящи сензори от минимален клас Sensirion SCD30 или SCD40/41 [25]. Чрез тях моделът може да се оптимизира така, че освен да се определя скоростта на насищане, да се идентифицират екстермуми (отваряне на прозорец) и да класифицира рисковете (нисък под 1000 ppm, среден от 1000 до 2000 ppm, висок над 2000 ppm).

- Интериорни камери (Driver Monitoring Systems). С тях може да се проследява честота на мигане, прозяване и наклоняване на главата. Воденият видеозапис на лицето на шофьора може да се обработва с библиотеката за компютърно зрение от типа на OpenCV. Това позволява на по-късен етап от обработката данните да се синхронизират с нива на визуални признаци за умора, като мигане, прозяване, мимики и други [26].

- Сензори на волана: алгоритмите анализират микро-корекции на волана. Когато тези корекции стават по-редки, но по-резки, те се приемат за признак за настъпваща умора.

- Параметри на купето и автомобила – заснема се обем, положение на клапата за рециркулация (отворена/затворена), която е критичен фактор за скокообразно нарастване на нивата на  $\text{CO}_2$ . Проследява се скоростта на вентилатора и съответстващ дебит на въздушния поток и скоростта на движение. За записването на параметрите на автомобила може да се използва бордовата мрежа със записващо устройство CANedge2 [27]. Тя може да се свърже към стандартния диагностичен конектор OBD-II. Чрез вградения спътников приемник и инерциален измервателен модул с технологията се отчита положението и динамиката на превозното средство.

- Фактори на вътрешната среда (пътници). Записва се информация за пътуващите в превозното средство – брой, речева и двигателна активност. Тези показатели повлияват интензивността на отделяне на въглероден диоксид и респективно върху скоростта на нарастване на концентрацията в купето.

- Технологично калибриране на измервателната апаратура:

Автоматизирано калибриране на сензорите за измерване – базира се на осреднените нива за последните 7 дни. Разчита се на около насищане (400-450 ppm). Не е подходящо при автомобили, паркирани в гаражни клетки.

Ръчно калибриране. Може да се изпълни следната процедура - автомобилът се оставя на открито с отворени врати за минимум 20 мин. Местоположението не трябва да е в непосредствена близост до източници на  $\text{CO}_2$ , задимяване и други.

Температурна стабилизация: след достигане на стандартните нива на газа за околната среда, във вече затворено купе се включва измерващият сензор за 20 минути (достатъчен период за достигане на работната температура). По

време на експеримента да се поддържа сравнително постоянна температура в купето (около 22°C).

За да се тества системата, преди началото на измерването се прави контролен отчет при отворени врати, като порядъка, който сензорът трябва да отчете, е в диапазона 400 и 450 ppm.

Калибрирането на налягането може да се направи с интегриране на температурен сензор BME280 или с външно измервателно устройство LOG32THP, които представляват алтернативни хардуерни решения за проследяване на съответния параметър.

Пространствено разпределение на измервателната апаратура. За осигуряване на представителни и коректни данни от измерванията, заснемащите сензори трябва да бъдат позиционирани в обсега на шлюзовете на климатика, но извън директната траектория на въздушния поток. По отношение на водача се приема, че трябва да са в обхвата на издишване, но не непосредствено пред дихателните органи. Това ще даде фалшиви пикови стойности в порядъка на 5000 ppm, които не са представителни за целия обем. Подходяща контролирана зона за монтаж е около огледалото за обратно виждане или друго място в близост до главата на шофьора. Всички измервателни уреди трябва да са неподвижно фиксирани и предпазени от динамични вибрации.

Определяне на сценариите на пътуване. Изследователските сценарии обхващат различни експлоатационни условия, като например: задръстване, магистрален пробег и шофиране през тунел или други възможни за приетото времетраене от минимум 45 минути. При сценарий с тунелно преминаване задължително да се засече получаване на сигнал при входовете на тунела. При сценарий „задръстване в тунел“ да се води запис през минимален интервал 1-3 секунди. Тази ситуация може да се класифицира като високо рискова.

С оглед на безопасността на участниците да се прилага протокол за контролирано прекратяване, ако водачът е бил над 20 минути в условията на висок риск, защото се очаква проява на натрупващ ефект от когнитивен спад и негативните състояния няма да отшумят непосредствено след спадане на нивата на концентрация на CO<sub>2</sub> в купето.

#### 4.4. Изследвания в симулационни камери

Експериментите в симулационни камери показват, че нивата на въглероден диоксид (CO<sub>2</sub>), които обикновено се считат за безопасни, могат драстично да влошат способностите за управление на превозното средство. Този подход позволява прецизен анализ на тези промени чрез проследяване на микроколебания в поведението на водача в контролирана и защитена среда.

Проектиране на тестовата среда. За целта се проектира херметически изолирана от околната среда камера с контролиран затворен обем, в която е инсталиран професионален статичен автомобилен тренажор (принципът е аналогичен на представения в [15]). Монтира се система за контрол на въглеродното натоварване, която да изпълнява стъпково динамично повишаване на газа при минимум три контролни нива - базово (400 ppm), средно високо (1500 ppm) и високо (над 3000 ppm).

Регистриране на когнитивните и биометричните показатели. Този безрисков тестов модел позволява пълно измерване на когнитивното състояние на субекта. За проследяване на лицевите характеристики се използват сензорни инфрачервени камери за лицево разпознаване, специализирани очила за проследяване на погледа (obii Eye-Tracking) или други заснемащи системи. За най-добри резултати при анализ на умората, оптичният сензор на камерата трябва да бъде разположен на линията на очите на водача. За прецизна детекция на зениците и ирисовите изменения може да се добави инфрачервено (IR) осветление.

За проследяване на жизнените показатели се прилагат биометрични гривни, които отчитат в реално време сърдечния ритъм (пулс) и галваничната проводимост на кожата.

Изисквания към анализа в реално време при провеждане на експеримента.

Визуален анализ. Алгоритъмът трябва да следи за „микросън“, промени в честота на мигане и отклонение на погледа от пътната обстановка.

Телеметричен анализ за мониторинг на симулатора – софтуерът трябва да може да отчита и сравнява отклоненията от зададената траектория, скоростта на реакция при внезапно препятствие и динамиката на работа с педала на спирачката.

Анализ на погледа и вниманието. Изисква се специализирано софтуерно обезпечаване за разпознаване на ключови лицеви маркери като втрещаване, поскока на погледа и в същото време да изчислява индикатори за степента на стрес умора.

Анализ на психофизиологичното състояние. Изследването на психофизиологичното състояние на водача може да използва математически модел за оценка на умората и сънливостта чрез времево проследяване на затварянето на клепачите. В [28] се посочва, че процентът на времето, през което очите са затворени повече от 80% (PERCLOS индекс), е един от най-валидираните индекси, използвани за пасивно откриване на сънливост. От друга страна, CO<sub>2</sub> може да бъде разглеждан като депресант на централната нервна система и като допълнителен индикатор за действието му може да се ползва скоростта на затваряне на клепачите (скорост на мигане). Този показател е възприет в групата на най-надеждните за оценка на психофизиологично човешко състояние и нивото на внимание [28].

Избраният модел трябва да е прогностичен, за да осигури оценка на база класификация на състоянието на водача („Годен“, „Нарушено внимание“, „Критична умора“). Оценката се извършва въз основа на корелационния анализ между текущите нива на CO<sub>2</sub> и честотата на допуснатите грешки в симулатора.

Последователност на експеримента и предварителна подготовка:

- Подготовка на водача. Предварително да се направи над 20 минутно тестово шофиране при концентрация 400-420 ppm, с цел заснемане и дефиниране на стандартния поведенчески профил на конкретния субект.

- Фаза на натоварване – реализира се постепенно повишаване на CO<sub>2</sub> за всеки програмиран сценарий (магистрала, задръстване, тунел, тунел със задръстване, други).

- Калибриране на условията на вътрешната среда. Температурата да е константна и в порядъка на 22°C при стандартна относителна влажност. Да се регулира изкуственото осветление в камерата в рамките на 300-500 lux.

Хардуерно обезпечаване на експеримента:

- Газови сензори. Да се използват датчици минимум Sensirion SCD30 или SCD41. За SCD41 - Моделът SCD41 работи на фотоакустичен принцип и осигурява прецизно измерване в диапазона от 400 до 5000 ppm, притежавайки висока температурна и влажностна компенсация.

- Видеокамера (сензорен модул): високоскоростна камера с честота на опресняване минимум 90 fps (кадър в секунда) при резолюция 720p, за да се отчете мигането и състоянията на микросън. Допълнителни предимства са измерване на разстоянието до лицето на обекта и вградени технологии, превантивни изкривяване на лицето при резки движения.

- При симулиране на сценария „задръстване в тунел“ записът на данните се извършва през минимален интервал от 1 до 3 секунди. Паралелно с това към субектите в купето се прилага стандартизиран въпросник за оценка на вниманието и когнитивния спад. В логическата структура на предиктивния модел е заложено правилото, че ако времето за реакция и отговор на въпрос надвиши 2 секунди, състоянието автоматично се класифицира като „висок риск“.

## 5. Изводи и заключения

Направеният обзорен преглед показва, че изследванията, посветени на въздействието на CO<sub>2</sub> върху човешката физиология и когнитивното представяне, прогресивно нарастват. Въпреки това съществува ясна необходимост от

последващи разработки, които да анализират действителните ефекти от въглеродното насищане (като степен на концентрация и времетраене на експозицията) върху водачите на превозни средства, както и потенциалните рискове за безопасността на движението. Стандартните експериментални подходи формират две основни групи изследователски модели – безрискови (симулационни) и рискови (полеви). Досега получените резултати по двата подхода масово се разглеждат изолирано едни от други, което е обяснимо предвид ограничени брой проведени тестове и недостатъчни предходен опит. Анализът на съвременното състояние на проблема води до два основни извода:

- Разширяване на експерименталната база с провеждането на експерименти за оценка на въздействието на въглеродния диоксид като самостоятелен рисков фактор за пътната безопасност. Това ще позволи събраните данни да допълнят и оптимизират класическите системи за одитиране на безопасността на пътната инфраструктура.

- Интеграция и синергия чрез ИИ: Натрупването на интердисциплинарни знания и бързото навлизане на изкуственият интелект позволяват насочване на усилията към постигане на синергия между симулаторните и полевите тестови модели. Обединяването на резултатите от тях в обща предиктивна рамка значително ще ускори валидирането на експерименталните данни и практическото им внедряване в автомобилната индустрия.

## 6. Благодарности

Авторите изказват благодарности за финансовата подкрепа на ЦНИП при УАСГ по проект Д-180.

## 7. Литература

1. Edgar A. Diaz, Yeonseung Chung, Vasileios Papapostolou, Joy Lawrence, Mark S., Vivian Hatakeyama, Brenno Gomes<sup>1</sup>, Yasser Calil<sup>1</sup>, Rodrigo Sato, Petros Koutrakis, and John J. Godleski, Effects of Fresh and Aged Vehicular Exhaust Emissions on Breathing Pattern and Cellular Responses – Pilot Single Vehicle Study, NIH Public Access Author Manuscript, Published in final edited form as: *Inhal Toxicol.* 2012 April; 24(5): 288–295. doi:10.3109/08958378.2012.668572.
2. R A Angelova<sup>1</sup>, D G Markov, I Simova, R Velichkova and P Stankov, Accumulation of metabolic carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) in a vehicle cabin, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 664 (2019) 012010, *BulTrans2019* IOP Publishing, doi:10.1088/1757-899X/664/1/012010
3. Satish U, Mendell M J, Shekhar K, Hotchi T, Sullivan D, Streufert S and Fisk W J, Is CO<sub>2</sub> an indoor pollutant? Direct effects of low-to-moderate CO<sub>2</sub> concentrations on human decision-making performance *Environmental health perspectives* 120(12) 1671–7
4. Scott J L, Kraemer D G and Keller R J 2009 Occupational hazards of carbon dioxide exposure *J. of Chemical Health and Safety* 16(2) 18–22
5. Mathur G D 2018 Effect of cabin volume on build-up of cabin carbon dioxide concentrations from occupant breathing in automobiles *SAE Technical Paper*
6. ASHRAE., ANSI/ASHRAE Standard 62-2001 Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality, 2006 Supplement (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., Atlanta, GA.; 2001
7. Prem Mohan a, George K. Varghese, Simultaneous control of carbon dioxide and particulate matter inside a car cabin, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Volume 133, August 2024, 104301, <https://doi.org/10.1016/j.trd.2024.104301>
8. C.C. Goh, L.M. Kamarudin, S. Shukri, N.S. Abdullah, A. Zakaria, Monitoring of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) accumulation in vehicle cabin, 2016 3rd International Conference on Electronic Design (ICED), DOI:10.1109/ICED.2016.7804682.

9. T. W. Forbes, H. J. Zagorski, E. L. Holshouser, and W. A. Deterline, American Institute for Research, Pittsburgh, Measurement of Driver Reactions to Tunnel Conditions
10. Jie Han, Han Lin and Zhenkai Qin, Prediction and Comparison of In-Vehicle CO<sub>2</sub> Concentration Based on ARIMA and LSTM Models, *Appl. Sci.* 2023, 13 (19), 10858; <https://doi.org/10.3390/app131910858>, <https://www.mdpi.com/2076-3417/13/19/10858>
11. Patten Ch., Interior tunnel design and road traffic safety, Swedish National Road and Transport Research Institute
12. <https://www.premel.ch/IT/Road-Tunnel-Ventilation-Principles-00e73000> посетен 08.2026.
13. Kristopher B. Karnauskas, Shelly L. Miller, Anna C. Schapiro, Fossil Fuel Combustion Is Driving Indoor CO<sub>2</sub> Toward Levels Harmful to Human Cognition, 20 April 2020 <https://doi.org/10.1029/2019GH000237>.
14. <https://www.co2meter.com/blogs/news/23987521-high-co2-levels-in-your-car>, посетен 07.2026.
15. Ignacio Solis Marcos and Christine Hummelgård, CO<sub>2</sub> Project CO<sub>2</sub> effects on drivers' state and performance, Publik rapport, 2022-04-28
16. N. Hudda, S.A. Fruin, Carbon dioxide accumulation inside vehicles: The effect of ventilation and driving conditions, *Science of The Total Environment*, Volumes 610–611, 1 January 2018, Pages 1448–1456, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.105>
17. Kan Shimazaki, Yo Ishigaki, Kazunori Hayashi, Koji Fujita, Effects of in-car CO<sub>2</sub> concentration on driving: a preliminary study with taxi drivers, *Environ Occup Health Pract*, 2025 Aug 27;7(1):2025-0001, PMID: PMC12461243, DOI: 10.1539/eohp.2025-0001. eCollection 2025.
18. Changjiang Liu, Qiuping Wang, Simulating Human Visual Perception in Tunnel Portals, *Sustainability* 2021, 13(7), 3741; <https://doi.org/10.3390/su13073741>.
19. Guanfeng Yan, Mingnian Wang, Pengcheng Qin, Tao Yan, Yifan Bao, Xu Wang, Comparative study on drivers' eye movement characteristics and psycho-physiological reactions at tunnel entrances in plain and high-altitude areas: A pilot study, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Volume 122, April 2022.
20. Yonggang Wang, Longjian Wang, Chen Wang, Yangdong Zhao, How eye movement and driving performance vary before, during, and after entering a long expressway tunnel: considering the differences of novice and experienced drivers under daytime and nighttime conditions, 2016 Apr, doi: 10.1186/s40064-016-2148-y.
21. <https://www.sintef.no/en/latest-news/2010/tunnel-vision/>, посетен 08.2026.
22. <https://smartdrivingacademy.ie/articles/tunnel-vision-speed-driving.html>, посетен 08.2026.
23. Shiming He, Zhigang Du, Lei Han, Shoushuo Wang, Ying Chen, Impact of urban tunnel sidewall effect on drivers: Examining visual characteristics and driving behavior across different lanes, 105476, Volume 143, January 2024, 10.1016/j.tust.2023.105476.
24. Solis Marcos, Ignacio, CO<sub>2</sub> project – CO<sub>2</sub> effects on drivers' state and performance, Stockholm: Fordonsstrategisk Forskning och Innovation. FFI, 2022., p. 20.
25. <https://sensirion.com/products/catalog/SCD30>, посетен 07.2026.
26. <https://github.com/opencv/opencv>, посетен 07.2026.
27. <https://www.csselectronics.com/products/can-bus-data-logger-wifi-canedge2-gnss-imu>, посетен 08.2026.
28. Takashi Abe, PERCLOS-based technologies for detecting drowsiness: current evidence and future directions, *SLEEP Advances*, том 4, брой 1, 2023, zpad006, <https://doi.org/10.1093/sleepadvances/zpad006>

# Модифициран лагерен възел на експериментален прототип за триточково ударно огъване

## Modified bearing assembly of an experimental prototype for three-point impact bending

Маг. Инж. Теодор Атанасов

„Институт по металознание, съоръжения и технологии с Център по хидро- и аеродинамика „Академик Ангел Балевски“ към Българска академия на науките, 1574, София, бул. „Шипченски проход“ №67

[teodor01dgv@abv.bg](mailto:teodor01dgv@abv.bg)

**Резюме:** Разработен е специален лагерен възел с допълнителен механизъм, използван да замени пусковия механизъм с ръчно зареждане при изпитване на ударно огъване по метода на чук на Шарпи. Механизмът е специално приспособен чрез промяна в конструкцията и монтиран на стандартен (300 J) махален чук на Шарпи. Новоразработеният се използва да замени стандартния механизъм, чрез който се отклонява махалото на ъгъл  $\alpha$  и да позволи автоматично извършване на действието. Внедряването на модифицирания лагерен възел също дава възможност за автоматизиране на процеса по запис на данните от измерването, като може да се коригира ъгъла  $\alpha$ , и от там енергията на разрушаване на ударника – силомер при контакт с пробното тяло и прецизно да се настрои прототипа на енергия за разрушаване - 300J. Автоматичното отклоняване на ъгъл  $\alpha$  и пускане на махалото по време на изпитанието ще даде възможност за дистанционно управление на опитната установка и ще допринесе за безопасността на персонала по време на работния процес.

**Ключови думи:** МОДИФИЦИРАН ЛАГЕРЕН ВЪЗЕЛ, ПОВДИГАЩ МЕХАНИЗЪМ, ЧУК НА ШАРПИ

конструктивно изменение на лагерния възел и принципа за застопоряване и освобождаване на махалото.

## 1. Въведение

Стандартните модели на чука на Шарпи са снабдени със стандартен пусков механизъм, който е монтиран на корпуса на опитната установка и представлява храпов механизъм. Той блокира махалото в горна позиция, снабден е с ръчен лост за освобождаване на махалото от механизма за застопоряване. Махалото се повдига и освобождава от оператора ръчно по време на изпитанието. Целта на настоящата разработка е да позволи внедряване на модифициран лагерен възел, който е механично свързан с оста на махалото и чрез него може да се осъществи автоматизирано повдигане и освобождаване на махалото от ъгъл  $\alpha$ . Също така позволява и прецизна настройка на ъгъла  $\alpha$ , който гарантира потенциална енергия равна на 300J. Принципа на закрепване и действие на стандартен образец за триточково огъване е показан на фиг. 1:



**Фигура 1.** Стандартен лагерен възел на фабричен чук на Шарпи.

Както става ясно от Фиг. 1, конструкцията не позволява автоматизиране на процеса в този си вид и налага

## 2. Конструктивна разработка

За изпитване на ударно огъване по метода махален чук на Шарпи е разработена специална съставна – модифициран лагерен възел със специална конструкция за присъединяване, позволяваща механично свързване към оста на махалото, показана на (фиг.2) , състояща се от:

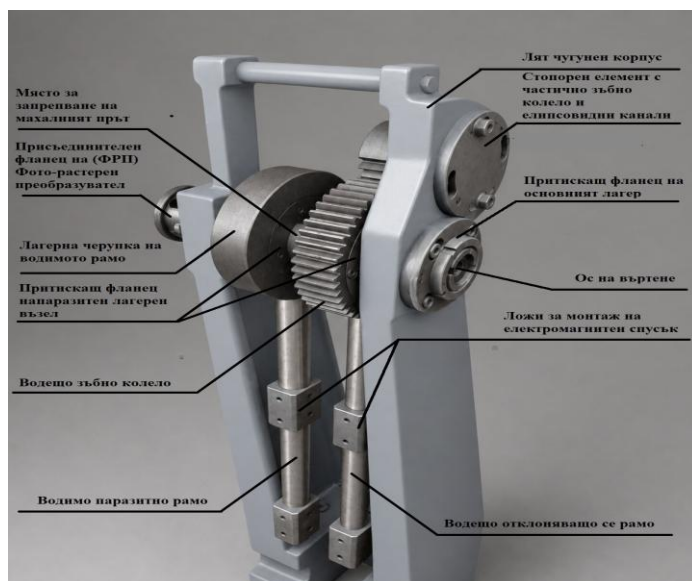
- Основни лагери на въртене в корпуса на установката
- Притискащ фланец за обикане на аксиално – радиалните хлабини на лагерите
- Видоизменена ос на въртене
- Фланец с елипсовидни отвори
- Видоизменени паразитни лагерни възли на водещото и воденото рамо със специални притискащи фланци за обикане на аксиално – радиалните хлабини на лагерите
- Рамо за повдигане и застопоряване на махалния прът – водещо рамо
- Спомагателно свободно рамо - водено рамо
- Ложи за закрепване на електромагнитен корпус

Както става ясно от фиг. 2, новата конструкция, сравнена със стандартния образец фиг. 1, търпи значителна модификация, но си запазва основната функция и изискванията, указани изрично в [1] и [2]. Целта е пълна автоматизация на процеса, поради което предприемам следното: Изработен е нов лят чугунен корпус, който да обезпечи изискванията на новата конструкция. В него са изработени строго концентрично и в допуск на отклонение съгласно [3] отвори за основните лагери. Всички останали обработени повърхнини и отвори са

изработени като са спазени всички условия за успоредност, перпендикулярност и концентричност зададени в техническата документация и съгласувани с [3]. Използвам сачмени лагери марка SKF, едноредови от серията с висока прецизност SNFA с номер 71906, както за основни така и за паразитни. Специални притискащи фланци за обирање на аксиално – радиалните хлабини на лагерите. Те позволяват настройване загубите на енергия, така че да може опитният образец да се калибрира съгласно стандартите [1] и [2]. Якостните пресмятания на основната ос, зъбното колело и застопоряващото частично зъбно колело са направени по методиките описани в [4]. За детайлите, които не се термо обработват използвам легирана конструкционна стомана марка 40X. За зъбното колело и частичното зъбно колело използвам стомана 42CrMo4 и термо обработка закаляване и отвързване. Оста е от стомана 40X, закалена и отвързната при 400°C с твърдост 40 HRC и шлайфана до точен размер.

### 3. Принцип на действие

Модифицираният лагерен възел дава възможност на експерименталния прототип да повдигне на ъгъл  $\alpha$  махалото на чука, чрез монтиран електродвигател с редуктор. Това става през водещото отклоняващо рамо, което е прикрепено към основното зъбно колело. На водещото и воденото паразитно рамо се закрепя електромагнитен спусък, който е в процес на разработка върху четирите ложи за закрепване, показани на фиг. 2. Двете рамена свързани заедно от механизма на спуска образуват мост, който се повдига на ъгъл  $\alpha$  чрез редуктор и се блокира от стопорния елемент с частично зъбно колело в горна точка. Заедно със себе си те увеличават махалото на чука на Шарпи на ъгъл  $\alpha$ .



**Фигура 2.** Модифициран лагерен възел за махален чук на Шарпи.

Чрез електромагнитния спусък махалото се освобождава и се завърта около оста на въртене, а рамената остават в горна позиция. Ъгълът на завъртане на махалото се отчита чрез монтиран (ФРП) Фото – растерен преобразувател. Той е монтиран на присъединителен фланец на корпуса на установката и оста му е присъединена към основната ос чрез специален съединител. Стопорният елемент с частично зъбно колело завършва с фланец с елипсовидни канали, посредством които може да се регулира фино ъгъла  $\alpha$ .

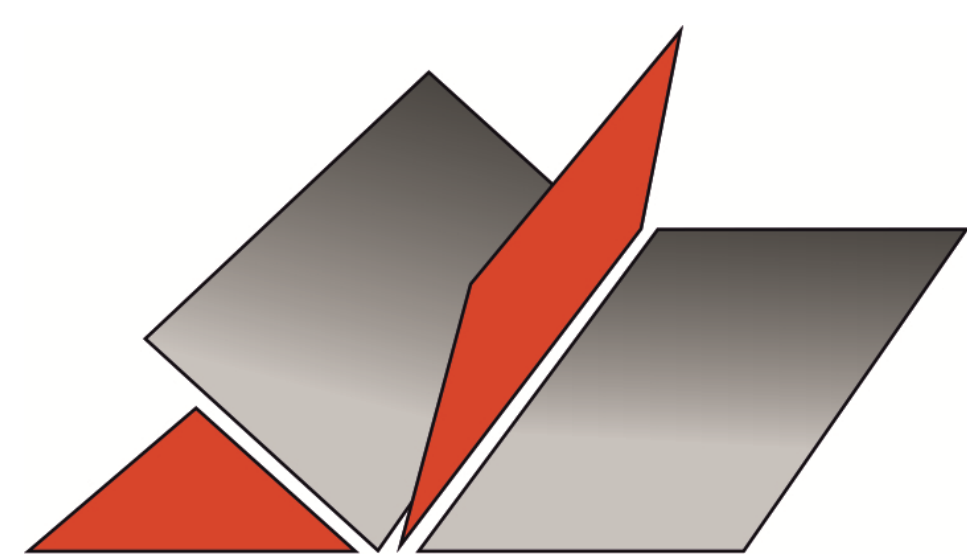
### 4. Заключение

- Разработен е модифициран лагерен възел, който има за цел да замени стандартния такъв на махален чук на Шарпи .
- Модифицираният лагерен възел е калибриран статично [2].
- Модифицираният лагерен възел е монтиран на чука на Шарпи.
- Модифицираният лагерен възел позволява да се разработи спомагателна система от електронни, електрически и пусково устройства, чрез които става възможно пълно автоматизиране на движенията на чука, както и записването и обработката на данните.
- Модифицираният лагерен възел дава възможност за автоматична работа на опитния образец на чука на Шарпи
- Проведени са сравнителни експерименти без пробно тяло на празен ход.
- Изчислена е загубата на енергия за един мах.
- Получените резултати съвпадат с данните, отчетени от стандартната скала за отчитане на ъгъла и характеристиките по стандарт [2].

### 5. Литература

- [1] Annual Book of ASTM Standards – section three –Volume 03.01; Jul 2006
- [2] EN 10 045-1 Metallic materials — Charpy impact test —Part 1: Test method; March 1990
- [3] ЕСКД - справочник по конструкторска документация - Оформяне и изисквания -Слава Русева, Карекин Папазян, Асен Атанасов, Стефка Петкова – 1988, издателство „Техника“
- [4] Машинни елементи – Част 1 – Георги Димчев, Иван Коларов – издателство „Софттрейд“ - 2006г.





## INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND TECHNICAL CONFERENCE

ENGINEERING. TECHNOLOGIES. EDUCATION. SAFETY.

### TECHNOLOGY AND SELECTED PROPERTIES OF PRODUCTS MADE FROM POLYMER COMPOSITES CONTAINING RECYCLED RUBBER AND MINERAL FILLER

Assoc. Prof. PhD. Eng. Tomasz Garbacz<sup>1</sup>, MSc. Eng. Karol Risinski<sup>1</sup>  
Department of Technology and Polymer Processing - Lublin University of Technology, Poland <sup>1</sup>

#### 1. Problem discussion

Material recycling of plastics involves recovering raw materials from waste, and reprocessing them enables the management of plastic waste that would otherwise have to be sent to landfill.

In addition, for environmental reasons, there is a need to use post-production and post-consumer waste of polymer plastics, mineral post-production waste such as fly ash and ceramic waste, which occurs in large quantities. The mineral filler in the produced composition is, for example, silica fly ash which is a by-product of coal combustion, shredded ceramic waste which is post-production waste, construction quartz sand.



Fig.1. Idea of solution for manufacturing products from polymer-mineral composition; polymer recyclate + mineral filler = product.

Polymer compositions can be made from recycled plastic, after recycling in the form of recyclates, flakes, and waste plastics, mineral fillers, that is, waste industrial dust, ceramic waste or sand. As a result, plastic waste and mineral, ceramic waste, which so far cannot be reused, will be efficiently processed to create new products. A product that can be manufactured from plastic waste with the addition of several dozen per cent of mineral compounds is polymer-mineral composites, which can be used to produce garden architecture components (bench slats, balcony panels, floor profiles for outdoor use), replacing concrete, ceramic, cast and vibro-pressed products.

#### 2. Objective and research methodologies

The aim of this study is to characterise the compression moulding efficiency of polymer composites containing recycled rubber elastomer, as well as to investigate and analyse selected physical properties of these polymer composites. The experimental part of the study involves the production of polymer composites via a compression moulding process and the testing of properties including processing shrinkage and the hardness of the moulded products. The study also presents the measurements and results of the tests carried out, as well as general conclusions.

The subject of the research is a mineral-polymer composite consisting of three components: EFDM rubber granules with a size of 0.8–2 mm obtained through recycling. The mineral filler was quartz sand in an amount ranging from 10% to 60% by mass. The particle size distribution of the sand used was 0.4–1.4 mm. A special cyanoacrylate adhesive for rubber recyclates was used as the binder.



Fig.2. The EFDM-type rubber granules and mineral filler (quartz sand) used in the research.

Unirubber's EFDM rubber granules are produced from rubber waste that has previously undergone mechanical recycling processes. Rubber waste includes washing machine seals, gaskets and car mats, sourced mainly from the automotive industry and the household appliances sector. These materials are carefully sorted, cleaned and then granulated into fine particles of the required size (fraction).

A hydraulic press fitted with a mould featuring interchangeable mould cavities was used to produce the composite by the pressing method. The PHM-63h press is a top-piston, frame-type press with individual drives.



Fig.3. A view of the working area of the PHM-63h hydraulic press with the mould and punch fitted.

The machine is primarily designed for the hot pressing of thermosetting plastics and rubber using the transfer or compression moulding method. For the purposes of the tests, a punch and a mould with four heating zones were fitted. The temperature of the moulding punch (5) and of each of the four heating zones (1-4) of the mould was set at 130°C. The moulding time was 10 minutes. Once the specified curing time had elapsed, the moulding had to be removed from the mould using an ejector.

#### 3. Results and discussion

Figure 4 show examples of the blocks produced, containing mineral fillers in quantities ranging from 0 to 60%.

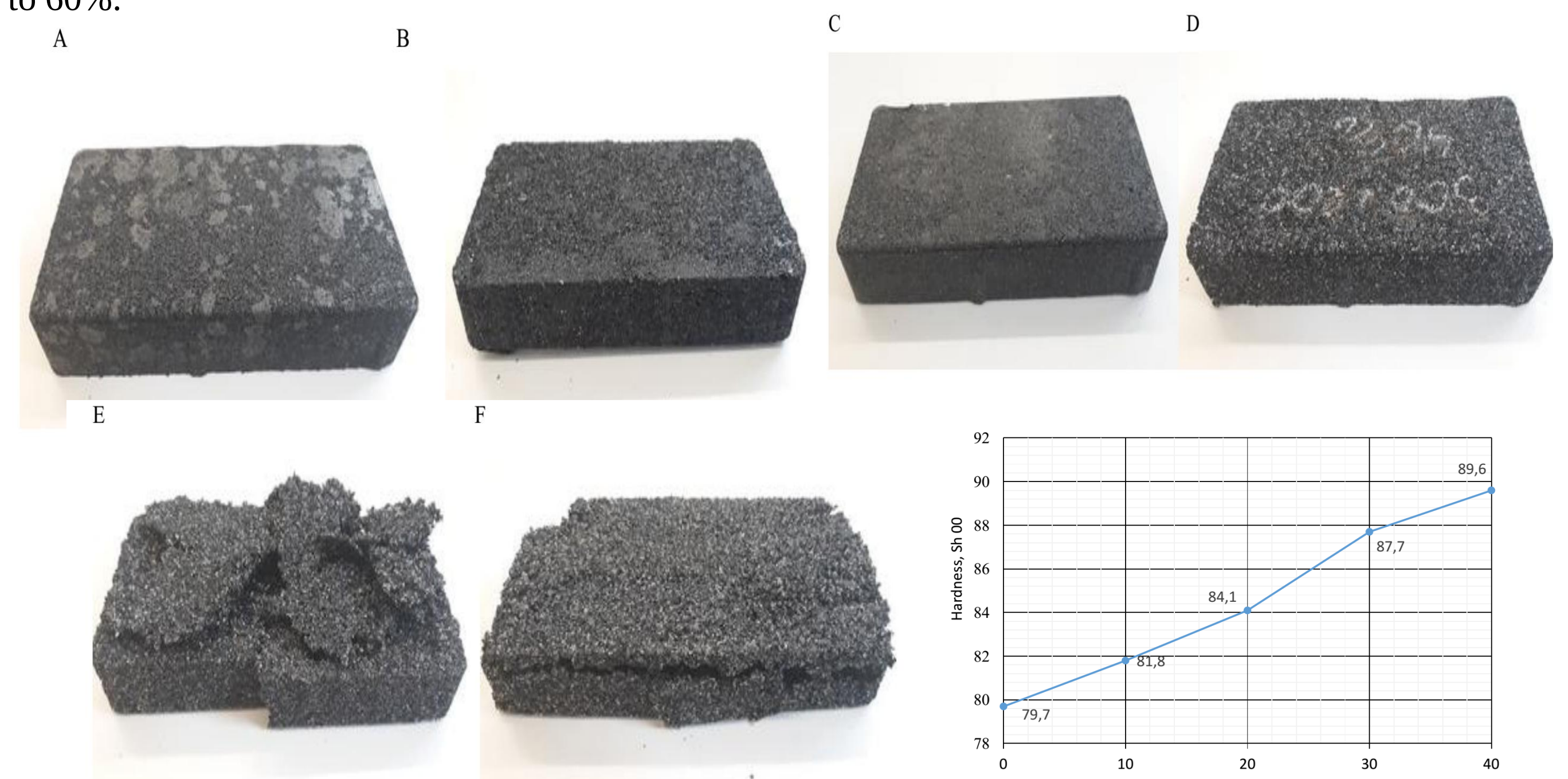


Fig. 4. Appearance of the produced cubes made from a mixture of recycled rubber and mineral filler, depending on the proportion of mineral filler: A – no filler, B – 20%, C – 30%, D – 40%, E – 50%, F – 60% mineral filler. Fig. 5. Change in the surface hardness of paving blocks made from a mixture of recycled rubber and mineral filler, depending on the amount of mineral filler.

Hardness tests were carried out using an Affrri Art.13 Shore hardness tester. The device allows for the recording of measurement results and electronic readout. Hardness measurements were carried out in accordance with standard EN ISO 868:2004, Plastics and ebonite – Determination of indentation hardness using a hardness tester (Shore hardness). The measurements were carried out using a test head and load suitable for measuring porous plastics – the Shore 00 method.

Figure 5 show the relationship between the surface hardness of the paving blocks produced and the mineral filler (quartz sand) content in the mixture. The graph is based on the average values of the hardness measurements. The sample made exclusively from rubber granules has the lowest average hardness value, at 80 Sh. In contrast, the sample containing 40% sand exhibits the highest average hardness value, at 90 Sh. It can be seen that hardness increases as the sand content in the composition increases. Every additional 20 per cent of sand in the composition results in an increase in the sample's hardness of approximately 5 Sh.

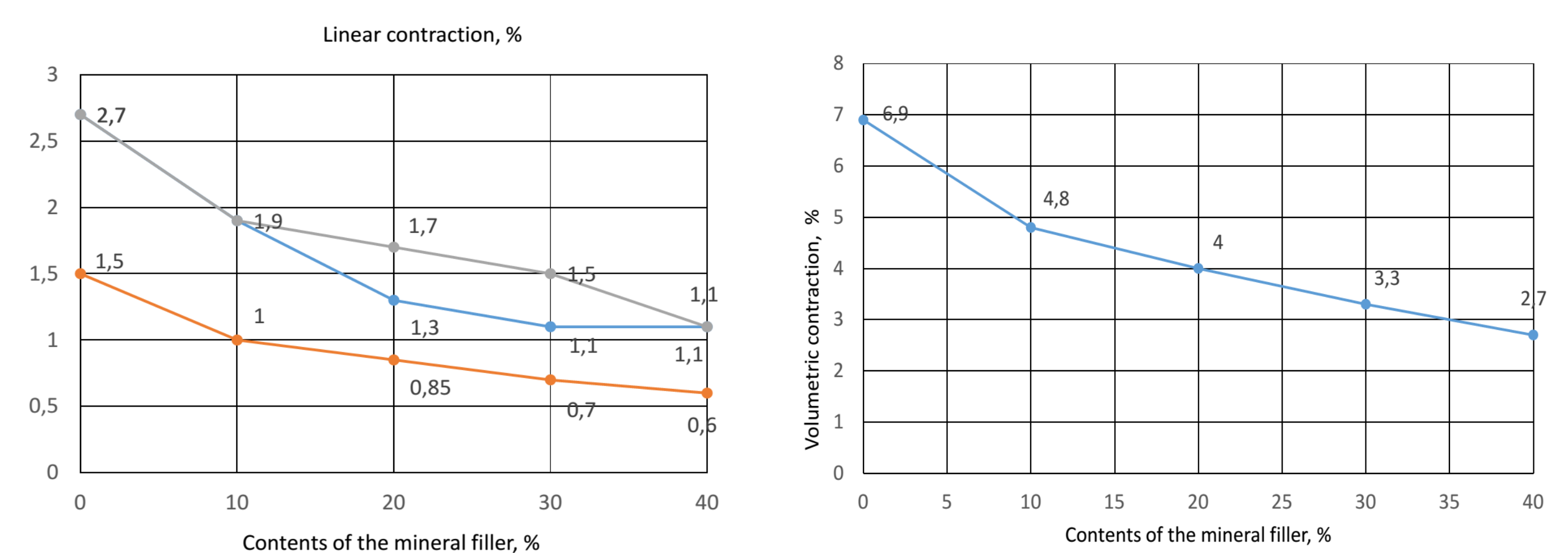


Fig.6. Changes in linear and volumetric shrinkage in blocks produced from a composition of recycled rubber and mineral filler.

The greatest volumetric shrinkage occurred in the sample made from rubber granules without any sand added, and amounted to 6.9%. In contrast, the smallest volumetric shrinkage, at 2.7%, was observed in the sample with a 40% sand content. It can then be seen that shrinkage decreases as the sand content in the mixture increases. The greatest linear shrinkage occurs in dimension a (sample width) for samples with 20%, 30% and 40% sand content. The smallest linear shrinkage occurs in geometric dimension b (sample length) for each sample produced. Figure 6 a shows the relationship between linear shrinkage and the sand content in the mixture from which the specimens were made, whilst Figure 6 b presents a comparison of volumetric shrinkage as a function of the sand content in the specimen.

#### 4. Conclusion

The sand content in the samples ranged from 10% to 60% of the total sample mass. In the samples containing 50% and 60% sand respectively, it was observed that the samples could not be fully compacted, as they disintegrated upon removal from the mould; consequently, the planned measurements could not be carried out on them. It can therefore be concluded that the developed composition may contain a maximum of 40% sand in order for the composition to be fully compacted.

The scope of the work also included carrying out hardness measurements on the samples produced. The sample made exclusively from rubber granules had the lowest average hardness value, at 79.7. In contrast, the sample containing 40% sand exhibited the highest average hardness value, at 89.6 Sh. An increase in hardness can be observed as the sand content in the composition increases. Moulding shrinkage was observed in the samples.

The greatest volumetric shrinkage occurred in the sample made from rubber granules without any sand additive, amounting to 6.9%. In contrast, the smallest volumetric shrinkage, at 2.7%, was observed in the sample with a 40% sand content. It can then be seen that shrinkage decreases as the sand content in the composite increases. The greatest linear shrinkage occurs in dimension a (sample width) for samples with 20%, 30% and 40% sand content.

The smallest linear shrinkage, however, occurs in the geometric dimension b (sample length) for each sample produced. In summary, the addition of sand to the rubber granulate resulted in an increase in the hardness of the moulded part produced by the compression moulding process and a reduction in compression shrinkage. It should be noted that the composition should contain a predominant amount of polymer material in order to carry out the compression moulding process fully.



# Security evaluation metrics for an adaptive steganographic method based on the Canny algorithm

Veselka Stoyanova<sup>1</sup>, Veselina Gagamova<sup>2</sup>  
 V. Levski, National Military University, Shumen, Bulgaria<sup>1</sup>  
 Rakovski National Defence College, Sofia, Bulgaria<sup>2</sup>  
 vtstoyanova@nvu.bg, v.gagamova@rncd.bg

**Abstract:** Steganography aims to conceal confidential information within digital media while minimizing perceptual and statistical distortions. Among image steganographic techniques, adaptive embedding methods have demonstrated superior resistance to steganalysis by exploiting image regions with high local complexity. One effective approach utilizes the Canny edge detection algorithm to identify suitable embedding locations. However, the effectiveness of such methods depends not only on embedding capacity but also on comprehensive security evaluation. This paper presents a systematic framework for assessing the security of an adaptive Canny-based steganographic method. Multiple objective metrics, including Peak Signal-to-Noise Ratio (PSNR), Structural Similarity Index Measure (SSIM), Mean Squared Error (MSE), histogram similarity, entropy variation, correlation coefficients, and resistance to statistical steganalysis are analyzed. The proposed evaluation framework demonstrates that edge-based adaptive embedding maintains high visual fidelity while significantly reducing detectability compared with conventional least significant bit (LSB) techniques.

**Keywords:** STEGANOGRAPHY, CANNY EDGE ALGORITHM, ADAPTIVE EMBEDDING, STEGANALYSIS, PSNR, SSIM, SECURITY METRICS

## 1. Introduction

The rapid growth of digital communication has increased the importance of protecting sensitive information during transmission. While cryptography conceals the content of a message, steganography conceals the very existence of communication. Modern image steganography seeks to embed secret information into digital images while preserving both visual quality and statistical characteristics.

The development of digital technologies has also strengthened the need for integrated approaches to information protection, in which technological solutions are considered together with organizational, human and societal factors. The interaction between technology, science and society is increasingly important in the process of digital transformation, providing a broader context for the development of innovative approaches to information protection [15].

Traditional Least Significant Bit (LSB) embedding techniques provide high payload capacity but are vulnerable to statistical attacks due to predictable modification patterns. Consequently, adaptive steganography algorithms have attracted considerable attention. These methods exploit image characteristics to determine embedding locations with minimal impact on image statistics. Steganography provides a way to transfer this information via ordinary files, thus reducing the risk of disclosure [18].

In [1] is presented the novel approach for non-destructive steganography by predetermination. The Canny algorithm (or Canny edge detector) is one of the most widely used edge detection algorithms in computer vision. It was developed in [14] by John F. Canny in 1986 to detect meaningful edges in images while minimizing noise and false detections. Edges detected by the Canny algorithm represent regions with significant intensity variation and visual complexity. Because modifications in these regions are naturally masked by existing image variations, edge-based embedding improves imperceptibility and decreases the probability of detection.

Although numerous adaptive embedding methods have been proposed, comprehensive security evaluation remains an active research challenge. This paper investigates quantitative metrics suitable for evaluating the security of Canny-based adaptive steganography.

From an information-security perspective, the effectiveness of a technical protection mechanism is also influenced by the awareness and competencies of the people who use and manage information systems. Research on cyber-awareness competencies in public administration emphasizes the importance of developing appropriate knowledge and skills for recognizing and managing

cybersecurity risks [16]. According to [20] the group of users aged 40-50 often know the basic gestures used on smartphones. They can prepare for future possibilities and properties for new digital and cybersecurity perspective era. This consideration is relevant to steganographic applications because the secure use of information-hiding techniques requires not only an effective algorithm but also an adequate understanding of the associated security risks and limitations. The main problem in implementation of Hough transform is the choice of sampling parameters [19].

## 2. Security evaluation metrics for an adaptive steganographic method

Figure 1 presents the main criteria for evaluating the security of steganographic methods. They include - visual imperceptibility, statistical indistinguishability, information entropy, correlation preservation, robustness against steganalysis and embedding efficiency.

The security of all steganographic systems have to be evaluated from multiple perspectives rather than relying on a single metric. The steganography methods are designed to satisfy three main criteria:

1. **Good detection**
2. **Good localization** - detected edges are as close as possible to the true edge.
3. **Minimal response** – each edge is detected only once.

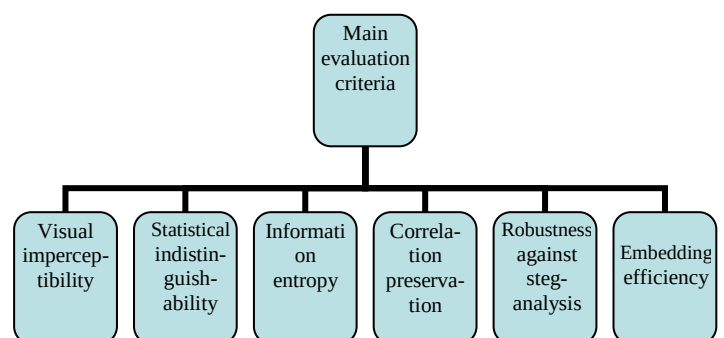


Fig. 1 Security evaluation metrics for an adaptive steganographic method.

### 2.1. Visual Quality Metrics

#### Mean Squared Error (MSE)

Mean Squared Error [5] measures the average squared difference between the cover image and the stego image. The characteristics studied are represented by formulas (1) and (2), the PSNR is based on values obtained for the MSE:

$$(1) \quad MSE = \frac{1}{mn} \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} [I(i, j) - K(i, j)]^2,$$

Where  $m$  and  $n$  are the width and height of the image;  $I(i, j)$  and  $K(i, j)$  are relevant pixels with coordinates  $(i, j)$  in the original stego-image.

#### Peak Signal-to-Noise Ratio (PSNR)

PSNR is one of the most widely used image quality metrics.

$$(2) \quad PSNR = 10 \cdot \log_{10} \left( \frac{max^2}{MSE} \right) = 10 \cdot \log_{10} \left( \frac{max}{\sqrt{MSE}} \right),$$

where  $max = 255$  for 8 bit images.

When,  $PSNR > 40$  dB indicates excellent visual quality,  $PSNR > 45$  dB is considered nearly imperceptible. Adaptive Canny-based embedding typically achieves PSNR values between 46 and 54 dB depending on payload.

#### Structural Similarity Index Measurement (SSIM)

Unlike PSNR, SSIM models human visual perception. SSIM values range from 0 to 1. Values exceeding 0.99 indicate almost identical images.

Equations (3), (4) and (5) are represented in [4] and they are the brightness, contrast, and the value of structural similarity):

$$(3) \quad l(x, y) = \frac{2\mu_x\mu_y + C_1}{\mu_x^2 + \mu_y^2 + C_1}$$

$$(4) \quad c(x, y) = \frac{2\sigma_x\sigma_y + C_2}{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2}$$

$$(5) \quad s(x, y) = \frac{2\sigma_{xy} + C_3}{\sigma_{xy} + C_3},$$

where  $C_1$ ,  $C_2$  and  $C_3$  are constants obtained by the equations.

$$(6) \quad C_1 = (K_1L)^2, \quad C_2 = (K_2L)^2.$$

In (6)  $L = 255$  for an image with 8 bits/pixel, and  $K_1 \ll 1$  and  $K_2 \ll 1$  are very small constants.

The final average value for the SSIM index is combined from the values obtained in (3), (4) and (5)

$$(7) \quad SSIM(x, y) = [l(x, y)]^\alpha \cdot [c(x, y)]^\beta \cdot [s(x, y)]^\gamma,$$

where  $\alpha > 0$ ,  $\beta > 0$  and  $\gamma > 0$  are parameters which determine the relative importance of the three components in the value of the  $SSIM(x, y)$ . In the article was accepted equal importance of brightness, contrast and value of structural similarity, i.e.  $\alpha = \beta = \gamma = 1$  and  $C_3 = C_2/2$ .

From the above-mentioned equation (7) follows in (8), which represents the final form of the SSIM index between two images of  $x$  and  $y$ :

$$(8) \quad SSIM(x, y) = \frac{(2\mu_x\mu_y + C_1)(2\sigma_{xy} + C_2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + C_1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2)}$$

In [7] was presented diagram of the structural similarity (SSIM) measurement system.

#### Entropy

[6] is the foundational reference for information entropy. Cachin's model employs the concepts of entropy and mutual information [2], [3] in the analysis and description of steganographic systems. According to information theory, the relative entropy of the processed data can never increase. Since the detector constitutes a form of processing, it follows that:

$$(9) \quad d(\alpha, \beta) \leq D(P_C || P_S).$$

Large entropy deviations indicate detectable modifications.

The Canny edge detector is widely used in object detection, image segmentation, medical image analysis, autonomous vehicles, robotics, industrial inspection, document scanning, face recognition preprocessing and satellite and aerial image analysis.

Performance metrics are included in table.1.:

**Table 1: Security evaluation metrics for an adaptive steganographic method**

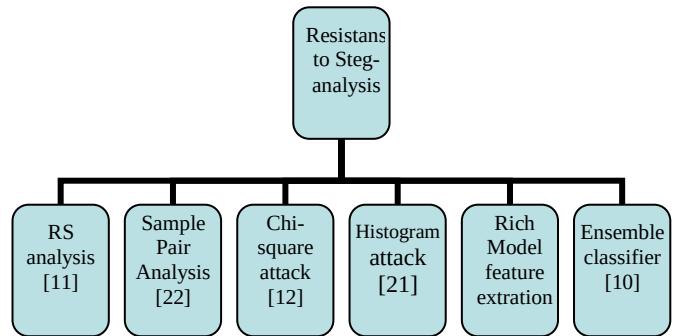
| Metric               | Desired Value |
|----------------------|---------------|
| PSNR                 | >45 dB        |
| SSIM                 | >0.99         |
| MSE                  | Minimal       |
| Entropy Difference   | <0.01         |
| Histogram Similarity | >99%          |
| Detection Accuracy   | ≈50%          |

The evaluation of steganographic security should also take into account the broader information-security environment in which the technique is implemented. In public-sector information systems, information sharing between cybersecurity structures is an important component of effective security management [17]. Consequently, the assessment of a steganographic method should not be limited to image-quality indicators, but should also consider the security of the information lifecycle, the context of communication and the potential interaction with other information-security mechanisms.

#### 2.2. Statistical Security Metrics

Histogram similarity [8] and resistance to steganalysis [9] are the main visual quality characters that help us compare two images. Histogram comparison evaluates whether embedding significantly alters gray-level distributions. Adaptive embedding should maintain nearly identical histograms. [13] aim to fill the existing gap in extant literature on image steganography schemes capable of resisting statistical steganalysis attacks, by providing a comprehensive systematic literature review.

Visual quality alone does not guarantee security, and proposed methods should also be evaluated using statistical resistance to steganalysis techniques. Recommended analyses include in fig. 2.



**Fig. 2. Resistance to steganalysis.**

### 3. An adaptive approach inspired by artificial intelligence.

In addition to the classic LSB method, an adaptive approach inspired by artificial intelligence principles has been implemented. The core idea is not to embed information uniformly across all pixels, but rather to use image analysis to select suitable regions.

To achieve this, image processing is applied to detect areas with higher variability, such as edges and textures. These zones are more suitable for embedding information, as changes within them are less noticeable.

This approach implements an adaptive algorithm inspired by artificial intelligence principles, in which the selection of embedding regions is not arbitrary but based on a preliminary

analysis of the image content. Although it does not employ a trained neural network, the proposed approach follows the fundamental systems *inspired by AI principles*: making decisions based on input data analysis rather than relying on pre-set, fixed embedding positions.

This data-driven approach is consistent with the broader development of intelligent digital technologies, where decisions are increasingly supported by analysis of the characteristics of available information rather than by uniform and predefined rules. In this sense, the proposed adaptive steganographic approach can be considered an exploratory application of intelligent decision principles to the selection of embedding regions.

The implemented adaptive algorithm proceeds through several successive stages. Initially, the color image is converted to grayscale, enabling a more effective analysis of the image's brightness and structure. Subsequently, edge detection is performed using the Canny algorithm, generating a map of regions with higher spatial variability. The resulting map is used to identify pixels suitable for embedding information. The hidden message is recorded solely in these areas by modifying the LSB of the corresponding pixels. This reduces the likelihood of visual changes being noticed, as the alterations are concentrated in areas with naturally high detail. At the end of the algorithm, the embedded message is extracted, and the MSE and PSNR metrics are calculated to evaluate the quality of the resulting output.

Figure 3 illustrates the conversion of the image to grayscale. This is a preliminary step that facilitates the analysis of pixel intensity and prepares for the detection of suitable regions for information embedding.



Fig. 3. Converting the image to grayscale

Figure 4 shows the result of applying an edge detection algorithm. These regions are characterized by higher variability and are suitable for information embedding, as changes within them are less noticeable

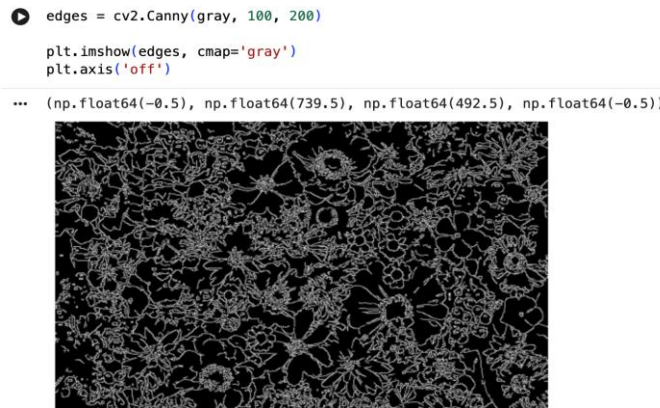


Fig. 4. Edge detection in the image

Figure 5 illustrates the implementation of an adaptive information embedding approach, in which data is recorded only in regions containing detected edges. This allows the modification to be concentrated in areas of higher variability, where it is less noticeable.

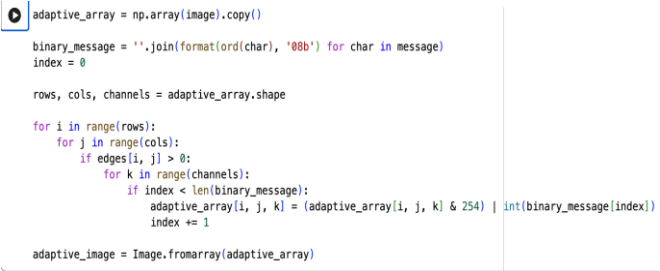


Fig. 5. Adaptive information embedding in selected areas

Experimental Evaluation

The Google Colab environment was used to conduct the experiment. It enables the execution of Python code directly in the browser, eliminating the need for local installation of programming libraries and development environments. This makes it particularly convenient for experiments involving image processing, machine learning, and data analysis.

The experimental part aims to demonstrate the viability of the selected information-hiding method within a real-world programming environment. The implementation utilizes the Google Colab platform and the Python programming language. The development process employs the NumPy, Pillow (PIL), OpenCV, and Matplotlib libraries, which provide the necessary tools for image processing, visualization, and result analysis.

Experiments performed using standard image datasets such as from publicly available imagelibrarie: Bossbase 1.01:

- Image name: Colorful flowers;
- Image size: 493 × 740 pixels;
- Payload: 112 bits=14 symbols-"Secret message";
- Edge threshold optimization;
- Comparison with conventional LSB embedding.

Initially, an experiment was conducted on a single test image, comparing the classical LSB method with an adaptive approach based on the selection of regions containing more detail and edges. The results obtained are presented in Table 2.

Table 2. Results of the comparison between the classical and adaptive approaches in a single experiment

| Method          | MSE      | PSNR (dB) |
|-----------------|----------|-----------|
| Classical LSB   | 0.000053 | 90.89     |
| Adaptive method | 0.000048 | 91.28     |

4. Conclusion.

The report presents a literature review of the key characteristics and metrics examined when analyzing the quality of image steganography techniques.

The analysis shows that the adapted approach does not completely replace classical methods but represents a natural evolution of them, expanding the possibilities for information protection in the modern digital environment.

The obtained results show that both methods achieve very low MSE values, meaning that the changes to the images following information embedding are minimal.

The results also indicate that adaptive selection of embedding regions can contribute to improved visual fidelity, as demonstrated by the lower MSE and higher PSNR obtained for the adaptive



method in the conducted experiment. This supports the use of image-content analysis as a basis for selecting embedding locations, while further experiments with larger datasets and additional steganalysis methods are necessary to assess the general applicability and security of the approach.

From a broader cybersecurity perspective, the proposed approach should be considered as one component of a multilayer information-protection framework rather than as a standalone security mechanism. Its practical effectiveness depends on the characteristics of the communication environment, the protection of information-sharing processes and the level of cybersecurity awareness of the users involved [16], [17].

### Acknowledgment

This report was written thanks to funding from the Ministry of Education and Science in implementation of the National Strategy for Research Development 2017-2030 under the National Scientific Programme "Security and Defence", adopted by Decision of the Council of Ministers No. 731 of 21 October 2021.

The authors would like to thanks that paper was supported by the National Scientific Program "Security and Defense", which has received funding from the Ministry of Education and Science of the Republic of Bulgaria under the grant agreement no. Д01-74/19.05.2022.

## 5. References

- Atanasov V. T., Denev D. R., Tsankov T. S. *A novel approach for non-destructive steganography by predetermination*. International Journal on Information Technologies and Security, **vol. 17**, № 3, (2025), ISSN 1313- 8251, pp. 73-82, <https://doi.org/10.59035/VZCX5068>.
- Blahut, R. *Principles and Practice of Information Theory*. Addison-Wesley, (1987).
- Cover, T, J.Thomas. *Elements of Information Theory*. Wiley,(1991)/
- Wang Z., Bovik, A. C., Sheikh, H. R., and E. P. Simoncelli. "Image quality assessment: From error measurement to structural similarity," *IEEE Trans.ImageProcessing*, **vol.13**, (Jan.2004).
- Gonzalez, R. C., & Woods, R. E. (2018). *Digital Image Processing* (4th ed.). Pearson.
- Shannon, C. E. (1948). "A Mathematical Theory of Communication." *Bell System Technical Journal*, **27**, 379–423, 623–656.
- Wang, Z., Bovik, A. C., Sheikh, H. R., & Simoncelli, E. P. (2004). "Image Quality Assessment: From Error Visibility to Structural Similarity." *IEEE Transactions on Image Processing*, **13**(4), 600–612. doi: 10.1109/TIP.2003.819861
- Rasheed, M., D. Shi, H. Khan, *A comprehensive experiment-based review of low-light image enhancement methods and benchmarking low-light image quality assessment*, *Signal Processing*, **vol. 204**, (2023), 108821, ISSN 0165-1684, <https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2022.108821>.
- Apau R, Asante M, Twum F, Ben HayfronAcquah J, Peasah KO (2024) *Image steganography techniques for resisting statistical steganalysis attacks: A systematic literature review*. PLoS ONE **19**(9): e0308807. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0308807>.
- Kodovsky, J., Fridrich, J., V. Holub, *Ensemble Classifiers for Steganalysis of Digital Media*, (2012), *IEEE Transactions on Information Forensics and Security* **7**(2):432-444, DOI:10.1109/TIFS.2011.2175919/
- Fridrich, J., Goljan, M., & Du, R. (2001). "Reliable Detection of LSB Steganography in Color and Grayscale Images." *Proceedings of the ACM Workshop on Multimedia and Security*/
- Westfeld, A., & Pfitzmann, A. (1999). "Attacks on Steganographic Systems.", in *Information Hiding Workshop*.
- Apau R, Asante M, Twum F, Ben Hayfron-Acquah J, Peasah KO. *Image steganography techniques for resisting statistical steganalysis attacks: A systematic literature review*. PLoS One. (2024);**19**(9):e0308807. doi: 10.1371/journal.pone.0308807. PMID: 39283894; PMCID: PMC11404826 .
- Canny, J. (1986). "A Computational Approach to Edge Detection." *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, **8**(6), 679–698.
- Pricop, Diane; Vasileva, Violeta. 2025. "AfterLand: integrating art and science for sustainable transformation in the Danube Delta". In: Pau Alsina, Tere Badia and Andrés Burbano (coords.). Node "Arts, science, technology and society as a catalyst for change". Artnodes, no. 37. UOC. DOI: 10.7238/artnodes.v0i37.432899.
- Vasileva, Violeta; Hlebarov, Jordan. 2021. "Methodology for Improving Cyber Awareness Competencies of Employees in Public Administration". *Proceedings of the 10th International Conference on Application of Information and Communication Technology and Statistics in Economy and Education (ICAICTSEE-2020)*, Vol. 100, Publishing Complex – UNWE, Sofia, Bulgaria, pp. 278–285. ISSN 2367-7635 (print), ISSN 2367-7643 (online).
- Vasileva, Violeta. 2020. "Information Sharing Processes in Public Sector Cybersecurity Structures". *Proceedings of the 9th International Conference on Application of Information and Communication Technology and Statistics in Economy and Education (ICAICTSEE-2019)*, Vol. 100, Publishing Complex – UNWE, Sofia, Bulgaria, pp. 136–147. ISSN 2367-7635 (print), ISSN 2367-7643 (online).
- Kozarev, G. A., St. H. Parvanov, "Research opportunities for using steganographic methods in the field of defense", *Proceedings of International Scientific Conference-Defense Technologies DefTech 2024*, Shumen, pp.637-642, ISSN 2367-7902.
- D. I. Dimitrov, D. A. Atanasov, "Implementamion of the hough transform in detection of target trajectory", *International Scientific Conference 2017*, Shumen, ISSN 2367-7902.
- Mincheva, St., "Research on users interaction with a touchscreen", *Annals of Konstantin Preslavsky University of Shumen*, **vol. XIV E**, (2024), ISSN: 1314-8818 (print), ISSN: 2815-4703 (online), pp.195200. <https://doi.org/10.46687/YT24SDM>, Годишник ФТН 2024.
- Maes, M. (1998). *Twin Peaks: The Histogram Attack to Fixed Depth Image Watermarks*. In: Aucsmith, D. (eds) *Information Hiding*. IH 1998. *Lecture Notes in Computer Science*, **vol 1525**. Springer, Berlin, Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/3-540-49380-8\\_20](https://doi.org/10.1007/3-540-49380-8_20).
- Dumitrescu, S., Xiaolin Wu and Zhe Wang, "Detection of LSB steganography via sample pair analysis" in *IEEE Transactions on Signal Processing*, **vol. 51**, no. 7, pp. 1995-2007, July 2003, doi: 10.1109/TSP.2003.812753.



# Zkap anti-corruption output filter: a cryptographically verifiable compliance protocol for the deployment of artificial intelligence in investigative, regulatory, supervisory and judicial procedures

Radoslav Y. Radoslavov \*, Eng. Ivan Y. Getsov

Independent researchers

Law Office — Ruse, Bulgaria · Advanced Consulting London RR, United Kingdom

ORCID: 0009-0003-6868-8083

\* Corresponding author. E-mail: radoslav@radoslavov.bg · zkap@advanced-consulting.london

Patents: BG/P/2026/114317; BG/P/2026/114328 · EPO/PCT/UKIPO in preparation · FRAND-ready

IPC: G06F 21/64; G06N 20/00; H04L 9/32

**Abstract:** The integration of artificial intelligence into judicial and administrative procedures raises a structural regulatory crisis. The European Union has imposed simultaneous and competing obligations: on one hand, the AI Act (Regulation (EU) 2024/1689) mandates transparency, human oversight, and accuracy for high-risk systems; on the other, the GDPR (Regulation (EU) 2016/679) and the Trade Secrets Directive (2016/943) impose strict confidentiality. This article proposes the ZKAP (Zero-Knowledge Audit Protocol) Anti-Corruption Output Filter as a cryptographically verifiable compliance mechanism that resolves the conflict at the operational layer of AI-assisted judicial workflows. The filter operates on a universal dual-axis decomposition of any procedural norm into a fixed set of mandatory positions (X) and conditions (Y); output generation is automatically blocked when any element is unmet, and any manual override triggers a non-disclosable escalation signal to the institutional supervisor, containing only metadata. We demonstrate the architecture through a polynomial decomposition of one specific Y-element — the determination of the circle of investigated persons under the Bulgarian Asset Recovery Act (ZONPI), implementing § 1, items 6, 15, 18 and 19 of its Supplementary Provisions, Articles 6, 7 and 143 of the Family Code and Article 2 of the Persons and Family Act. The polynomial is validated on a fully synthetic test family configuration designed to exercise all nine qualification members; the synthetic profile is purely illustrative and contains no personal or case-related data. The chosen example is intentionally one of the architecturally shallower components of the filter, used here to illustrate the polynomialization principle; in parallel deployment, substantively deeper components — banking pattern analysis, real estate transformation, fiscal coherence, and the determination of significant asset disparity — are similarly polynomialized but remain outside the scope of this article. The architecture is patent-protected under Bulgarian filings 114317 and 114328, with EPO/PCT/UKIPO submissions in preparation. The contribution proposes the architecture as an operational compliance mechanism that can be implemented either through institutional codes of conduct or through normative acts, depending on the procedure-specific corruption-risk profile.

**Keywords:** ZKAP, ZERO-KNOWLEDGE PROOF, ANTI-CORRUPTION FILTER, AI ACT, GDPR, ZONPI, POLYNOMIAL DECOMPOSITION, COMPLIANCE-BY-DESIGN, OVERRIDE ESCALATION, JUDICIAL AI

## 1. Introduction

### 1.1. The need for a reliable and fail-safe automated anti-corruption filter

Some procedures carry an inherently high corruption risk: forfeiture proceedings under the Bulgarian Asset Recovery Act (ZONPI) [6], tax audits, public procurement, concessions. What they have in common is a wide field of discretion, and discretion is exactly what lets the law be applied unevenly — its scope quietly widened or narrowed, a decision nudged away from the norm for reasons that lie outside it. The classical remedy for such drift is review after the fact, by a superior body or a court. That remedy is slow, it happens only now and then, and whether it happens at all depends on whether a particular reviewer looks and cares. A supervisory design of that kind is not fail-safe; and fail-safety is precisely what the rule of law requires [16].

What such procedures need is an automated anti-corruption filter with four properties. It has to act in real time, on every result rather than on a sampled few. It has to be fail-safe, so that it no longer matters whether a reviewer is paying attention. It must leave no room for silent non-compliance: every departure has to leave a trail that someone can later follow. And it has to be attestable by cryptographic means, so that the result can be trusted without trusting the person who produced it. This article sets out such a filter, built on the ZKAP (Zero-Knowledge Audit Protocol) architecture [20] and applied to the output of AI-assisted work in the procedures just described.

The regulatory setting only sharpens this need. The AI Act (Reg. (EU) 2024/1689) demands transparency, human oversight and accuracy from high-risk systems [2]; at the same time the GDPR [1] and the Trade Secrets Directive [3] pull in the opposite direction, restricting access to personal data and to protected commercial information. And manual inspection of a model's internal logic is impractical already at billions of parameters; at exa-scale parametrization — above  $10^{18}$  parameters — the horizon of auditability is passed definitively. Taken together, these pressures

point to a filter that operates on the output itself, and that needs neither the contents of the case file nor a view inside the model.

### 1.2. Contribution of the article

What the article puts forward is the ZKAP anti-corruption filter — a mechanism that sits between the AI system's output and the moment its decision takes effect. In outline, the filter does four things:

- (a) does not assess the internal logic of the model, but only checks the output against formalized legal requirements;
- (b) automatically blocks generation when prerequisites are incomplete or conditions are unmet;
- (c) permits an operator override, but every such override generates a cryptographically signed signal to the supervisor containing exclusively procedural metadata — no case-file content, no identifying data of the persons concerned;
- (d) uses a dual-axis decomposition (X — mandatory positions; Y — conditions) of the norm, in which every X-element and every Y-element can be further decomposed into a polynomial representation traceable to specific legal norms and documentary sources.

To make the polynomial principle concrete, the article works through one legal condition in full — the determination of the circle of investigated persons in ZONPI proceedings. The aim here is strictly didactic. This is not a complete decomposition of an administrative polynomialization; the remaining elements — banking analysis, property transformation, fiscal comparability, significant disparity — fall outside the present scope and are treated in separate studies. The article carries forward the framework set out in [19] and develops the one element in which the regulatory paradox finds an operational resolution.

## 2. Theoretical foundation

### 2.1. Regulatory context: screening without access to personal data

The regulatory framework leaves only a narrow space in which supervision can operate. On one side the AI Act asks for transparency (Art. 13) and human oversight (Art. 14) [2], while the GDPR imposes data minimisation (Art. 5(1)(c)) and forbids processing special categories of personal data without a legal basis (Art. 9) [1], and the Trade Secrets Directive shields undisclosed know-how [3]. On the other, the independence of those who investigate and decide — the inspector, the judge, the prosecutor, the expert — can be protected from pressure and abuse only if the supervisor has no direct sight of a particular case file before the final act is issued. Put together, these demands leave one workable option: anti-corruption screening carried out on the system's output and on procedural metadata, and never on the case data themselves.

## 2.2. Limitations of XAI as a compliance mechanism

The familiar tools of explainable AI — LIME [14], SHAP [15] and their descendants — give approximations, not proofs. Each produces an explanation after the fact, and an explanation of that kind can be steered by a careful choice of samples or neighbourhoods. In an adjudicative setting that is not enough: if a decision is to carry evidential weight, its explanation has to be verifiable, not merely believable [18]. Beyond Transparency [21] makes the same point — SHAP and LIME serve the indicative function of explainability but not the evidentiary one.

## 2.3. From disclosure of substance to proof of property

The answer worked out in ZKAP [20, 21] turns on a single move: the auditor never sees the substance of the computation, but receives instead a mathematically verifiable proof that the computation has certain properties [9]. The audit stops being an act of disclosure — showing what is there — and becomes an act of attestation — proving that a property holds. That shift is what lets transparency and confidentiality coexist: the property is attested, yet the substance behind it stays hidden.

## 3. ZKAP architecture

### 3.1. Five patented innovations

ZKAP rests on five innovations protected by patent applications BG/P/2026/114317 and BG/P/2026/114328 [20, 22, 23]:

**Certified Stack** — an indivisible, bit-identical computational object which welds the software to the hardware through a Root Hash. It comprises the model artefact, a bit-integrity policy and a fixed runtime stack. It ensures determinism and immunizes against technical noise.

**Commitment Layer** — cryptographic binding through Merkle trees and SNARK/STARK proofs. The static Root Hash is published in a regulatory register, while dynamic proofs verify execution in real time.

**Compliance Circuits** — arithmetization of legal norms into polynomial equations. Threshold Logic (0.2% permissible technical noise) defines the boundary between legitimacy and violation. The Mandatory Solution automatically blocks upon discrepancies.

**Hardware Binding and Silicon Binding** — hardware isolation through Trusted Execution Environments (TEE), Memory Mapping and Bus Hashing. Silicon Binding welds the proofs to the physical chip, preventing substitution.

**Recursive Verification** — hierarchical aggregation of proofs through Recursive SNARKs, enabling scaling for exa-systems.

### 3.2. Compliance Circuits — arithmetization of legal norms

A Compliance Circuit is an arithmetic circuit (R1CS, PLONK or AIR) which represents a legal norm as a polynomial over a finite field. A satisfying assignment of the variables (the witness) attests that the factual data fall within the admissible space defined by the norm. The proof of that satisfaction is generated with a SNARK [10] or STARK [11] protocol.

Example: the rule “the OUTPUT is generated if and only if all  $X_i = T$  and all  $Y_j = T$ ” is arithmetized as a conjunction of indicators:

$$C_{X+Y}(w) = \prod X_i(w) \cdot \prod Y_j(w) - 1 = 0 \pmod{p}$$

where  $w$  is the witness,  $X_i(w)$  and  $Y_j(w)$  are indicator Boolean functions, and  $p$  is a large prime number taken as the characteristic of the finite field. The SNARK proves that there exists a  $w$  satisfying  $C_{X+Y}(w) = 0$ , without disclosing  $w$ .

### 3.3. Threshold Logic (0.2%)

Within the certified stack with integer quantization the output is bit-identical and the permissible deviation is zero. The 0.2% threshold applies outside that deterministic perimeter — in counterfactual statistical tests and in the integration of legacy environments lacking bit integrity, where floating-point noise and inference stochasticity are unavoidable. Below the threshold the proof passes; above it the Mandatory Solution blocks. The value is empirically derived and substantiated in [20] against alternative thresholds.

### 3.4. Silicon Binding

The proofs are welded to the physical chip through a unique Hardware Identifier (PUF — Physically Unclonable Function) embedded into every round of the Merkle tree. This prevents hardware substitution after submission of the proof — an attack which would otherwise permit falsification by copying the witness onto a more favourable machine.

### 3.5. Mandatory Solution

When a violation is detected the system does not just write a log entry and carry on — it stops the computation. Compliance ceases to be a declaration and becomes a condition of the hardware itself. Here lies the real break with earlier approaches: where they treat a rule as advice, ZKAP treats it as a technical limit, one that cannot be stepped around without leaving a cryptographic trace behind.

### 3.6. Recursive Verification

For systems with multi-billion parametrization, the individual Compliance Circuits are aggregated hierarchically through Recursive SNARKs. The proof of compliance of an entire exa-system reduces to a single aggregated proof with  $O(\log n)$  verifiable size and sub-millisecond verification time [20].

## 4. The anti-corruption output filter

### 4.1. Dual-axis decomposition $X + Y$

The anti-corruption filter rests on a universal decomposition of any legal rule into two independent axes:

$X$  — mandatory positions (substantive prerequisites). The substantive-law elements of the norm which must be established for the power to arise. For the reference rule of the demonstrator,  $n_X = 12$ .

$Y$  — conditions (procedural conditions). The procedural and temporal requirements which must be observed in exercising the power. For the reference rule,  $n_Y = 14$ .

The choice of  $n_X = 12$  and  $n_Y = 14$  is not arbitrary — they are empirically derived from a generalization of the requirements of a typical administrative procedure with high corruption risk. The same principle applies with other values for other legal fields; in real deployment, the administration or the legislator determines  $n_X$  and  $n_Y$  according to the procedure.

### 4.2. Operating principle

$$\text{OUTPUT}(\text{generated}) = T \Leftrightarrow (\forall i \in \{1..n_X\}: X_i = T) \wedge (\forall j \in \{1..n_Y\}: Y_j = T)$$

The output is generated automatically only when ALL mandatory positions and conditions are satisfied. If any element is missing, generation is blocked with a message explicitly listing the missing  $X$  and  $Y$ .

### 4.3. Override and escalation

OUTPUT(override) =  $T \Rightarrow \text{SIGNAL}(\text{supervisor, missing\_X, missing\_Y, metadata\_only})$

The override is a permissible instrument for exceptional cases, but every override leaves a traceable trail which reaches the institutional supervisory authority. The signal contains:

```
PROCEDURAL DEVIATION SIGNAL
Date/time: 2026-05-29 14:32:17
Case file No.: AP-2026/001
Executor: EX-001
Missing X: X3, X8
Missing Y: Y5, Y11
ZK proof commitment: a4b7...d2e1
Recipients: Head of institution + direct superior
Case-file content NOT INCLUDED (GDPR Art. 5(1)(c)).
```

### 4.4. Options for strict implementation of the catalogues

A realizable prototype of the filter has been developed in architectural form [24] and operates on an exemplary simulation with a fixed number of mandatory positions, conditions and alternative explanations. That parametrization is illustrative; in production deployment, the content of the X-positions, the Y-conditions and the catalogue of admissible alternative explanations is subject to strict definition along two possible paths.

(a) Internal rules of the administration (Code of Conduct). The authority itself adopts a written act formalizing the content of X and Y for the specific procedure, exhaustively defining the admissible alternative explanations for each positive indication and determining the level of escalation. This approach permits rapid adaptation to the specifics of the particular administration and the accumulation of operational experience. It is particularly suitable for initial deployments and for procedures with a lower degree of normative standardization.

(b) Normative act. The legislator (the National Assembly or the Council of Ministers) adopts a statute or regulation fixing the content of X and Y for a defined category of proceedings. This approach yields maximal legal certainty and uniformity at national level, but requires a longer sub-legislative cycle. It is appropriate for procedures with particularly high corruption risk (ZONPI proceedings, above-threshold public procurement, concessions).

Both approaches are technically realizable through one and the same ZKAP protocol — the difference lies in the legal nature of the rule, not in the technical layer. This is a fundamental advantage of the architecture: a single technical solution serves multiple legal regimes.

## 5. Polynomial decomposition — demonstration example

### 5.1. Rationale for the choice

To illustrate the principle of polynomial decomposition, we select one specific Y-element: the determination of the circle of investigated persons in ZONPI proceedings [6]. This element is deliberately chosen from the operationally shallower layers of the filter — it demonstrates the principle on a legal condition with a small number of classification classes and a comparatively simple structure. The purpose of the demonstration is pedagogical: to show how an evaluative legal concept is transformed into a deterministic Boolean function.

The article does not aim to present a complete decomposition of an administrative polynomialization. The remaining layers of the filter — analysis of banking movements, tracing of real-estate transformation, fiscal comparability, determination of significant disparity under § 1, item 3 of the Supplementary Provisions of ZONPI in the light of Interpretative Decision No. 4/2021 of the General Assembly of the Civil Chamber of the Supreme Court of Cassation [5] — are not addressed within this publication. Their polynomial representation follows the same architectural principle but requires independent development owing to their specific

complexity. The continuing divergence in the case law even after that interpretative decision — which prompted the opening, in January 2026, of Interpretative Case No. 1/2026 of the General Assembly of the Civil Chamber of the Supreme Court of Cassation on the mandatory substantive-law prerequisites for forfeiture — further underscores the breadth of discretion in these proceedings and, with it, their corruption-risk profile.

### 5.2. Formal definition

The polynomial of the circle of investigated persons is defined as a disjunction of nine members  $M_1$  to  $M_9$ :

$$\text{CIRCLE}(x; D) = \{ x \in U : \exists i \in \{1, \dots, 9\} : M_i(x, D) = T \}$$

where  $x$  is a candidate for inclusion,  $U$  is the universal set of persons (natural and legal) identified through registry inquiries, and  $D$  is the case with its procedural and factual data.

The nine members cover the three statutory groups:

Member  $M_1$  — the investigated person.

Members  $M_2$ ,  $M_3$  and  $M_5$  — family members under § 1, item 19 of the Supplementary Provisions:  $M_2$  — spouse;  $M_3$  — person in de facto cohabitation;  $M_5$  — minor children.

Members  $M_4$  and  $M_6$  to  $M_8$  — connected persons under § 1, item 15 of the Supplementary Provisions in conjunction with Art. 144 ZONPI:  $M_4$  — former spouse within five years;  $M_6$  — relatives in the direct line;  $M_7$  — collateral relatives of the 2nd to 4th degree;  $M_8$  — relatives by marriage of the 1st to 2nd degree.

Member  $M_9$  — controlled legal entity under § 1, item 6 of the Supplementary Provisions in conjunction with Art. 145 ZONPI.

### 5.3. Atomic predicates and evidentiary hierarchy

Each  $M_i$  decomposes into a conjunction/disjunction of atomic Boolean predicates. The central and most complex is  $M_3$  (de facto cohabitation under § 1, item 18 of the Supplementary Provisions), which decomposes into nine cumulative attributes:

$$M_3 = p_1 \wedge p_2 \wedge p_3 \wedge p_4 \wedge p_5 \wedge p_6 \wedge p_7 \wedge p_8 \wedge p_9$$

where:  $p_1$  — voluntary cohabitation;  $p_2$  — joint;  $p_3$  — on a conjugal basis;  $p_4$  — both persons are of full age (Art. 2 of the Persons and Family Act [8]; marital emancipation under Art. 6(4) of the Family Code [7] confers legal capacity but not majority);  $p_5$  — no kinship relation constituting an impediment to marriage (Art. 7(2) of the Family Code);  $p_6$  — duration above 24 months;  $p_7$  — mutual care;  $p_8$  — common household;  $p_9$  — intersection with the investigated period.

Each atomic predicate is verifiable against a hierarchy of documentary sources:

Category A — official public documents (the civil registry ESGRAON, the population register, the Property Register, notarial deeds, birth/marriage/death certificates, court judgments). Highest evidentiary force.

Category B — special official documents (protocols of the Commission, prosecutorial decrees). High force for procedural facts.

Category C — private documents (service contracts, bank statements, witnesses, correspondence). Medium force; admissible for de facto cohabitation, since it is a factual state.

Category D — creations of the Commission itself (the statement of claim, the reasoned request). Admissible ONLY as an admission against the submitting party.

### 5.4. Exhaustion of alternative explanations

The fail-safety of the polynomial requires that every positive indication be checked against an exhaustive list of alternative explanations. For example: the indication “Y regularly transfers sums to X” cannot automatically establish mutual care before excluding the possibility that those transfers constitute maintenance for a common child under Art. 143 of the Family Code — an obligation arising from parenthood, not from cohabitation. The polynomial in the demonstrator version includes a catalogue of twenty alternative explanations for the five most critical indications

and the corresponding control inquiries (Commercial Register, civil registry, population register, court maintenance judgments).

Important methodological clarification: the presented catalogue is an exemplary simulation developed for demonstration purposes; the procedure for its strict definition in real deployment follows the two paths described in Section 4.4.

### 5.5. Scope of the present demonstration

The polynomial presented here does not exhaust the complete administrative polynomialization of a ZONPI proceeding. It illustrates the principle on one of the steps of the filter — the determination of the circle of investigated persons. A similar polynomial apparatus could be constructed for the remaining steps (analysis of banking information, tracing of property transformation, fiscal-and-social-security comparability, determination of significant disparity under § 1, item 3 of the Supplementary Provisions of ZONPI in the light of the binding interpretation in Interpretative Decision No. 4/2021 of the General Assembly of the Civil Chamber of the Supreme Court of Cassation [5]). Their development falls outside the scope of this article. The integrity constraints over the circle so determined are developed in a standalone technical specification and are the subject of a separate publication following the securing of the corresponding patent protection.

## 6. Application to a test example

### 6.1. Construction of the exemplary test profile

The profile is defined as a mathematical object — a table of typified roles with parametrized temporal boundaries. It is designed to activate different members of the polynomial simultaneously and to test the interaction between them. The catalogue of roles is exemplary; the procedure for its strict definition in real deployment follows Section 4.4.

|                                                        |                                                      |
|--------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| TEST PROFILE – candidates for the circle               |                                                      |
| P (investigated person)                                | – reference subject                                  |
| A (spouse of P)                                        | – marriage concluded within the period               |
| B (former spouse of P)                                 | – divorce $\geq 6$ years before the start            |
| C (de facto cohabitation)                              | – cohabitation $> 24$ months, bigamy excluded        |
| D (child from prev. marriage)                          | – of age at the end of the period                    |
| E, F (minor children from A)                           | – minors throughout the period + gifts within period |
| G (parent of P)                                        | – direct-line relative, no transaction               |
| H (parent of P)                                        | – direct-line relative, with a gift                  |
| I (brother of P)                                       | – collateral 2nd degree, with a gift                 |
| J (father-in-law of P)                                 | – affinity 1st degree, no transaction                |
| K (business partner)                                   | – legal entity with P's share $> 50\%$               |
| L (common non-profit entity)                           | – legal entity under § 1, item 6(d) Suppl. Prov.     |
| Inspection period: $T = [t_0, t_0 + 10 \text{ years}]$ |                                                      |

### 6.2. Expected behaviour of the polynomial

With a correct polynomial decomposition, each candidate should activate specific members according to the formalized rules:

|   |                                                                                                            |
|---|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| P | $\rightarrow M_1$ (investigated person)                                                                    |
| A | $\rightarrow M_2$ (spouse, marriage intersects T)                                                          |
| B | $\rightarrow \text{NOT } M_4$ (divorce precedes period by $\geq 6$ years; member also requires a transfer) |
| C | $\rightarrow M_3$ (de facto cohabitation – if all 9 atoms are satisfied)                                   |
| D | $\rightarrow M_5$ (part of T before D's 18th birthday) + $M_6$ (only if a transaction)                     |
| E | $\rightarrow M_5 \wedge M_6$ (minor + a gift)                                                              |
| F | $\rightarrow M_5 \wedge M_6$ (minor + a gift)                                                              |

|   |                                                                          |
|---|--------------------------------------------------------------------------|
| G | $\rightarrow \text{NOT } M_6$ (direct-line relative, but no transaction) |
| H | $\rightarrow M_6$ (direct-line relative + a transaction)                 |
| I | $\rightarrow M_7$ (collateral 2nd degree + a transaction)                |
| J | $\rightarrow \text{NOT } M_8$ (affinity 1st degree, but no transaction)  |
| K | $\rightarrow M_9$ (control under § 1, item 6(a) Suppl. Prov.)            |
| L | $\rightarrow M_9$ (control under § 1, item 6(d) Suppl. Prov.)            |

### 6.3. Execution of the polynomial and results

Upon filling in the atomic facts from the test profile and applying the polynomial formulas, the obtained results coincide fully with the expected behaviour. All 13 cases — the investigated person P and the twelve candidates — pass successfully. Several characteristics of the result are particularly important, demonstrating correctly implemented legal logic:

(a) Temporal sensitivity. Candidate D (of age at the end of the period) activates  $M_5$  only for the part of T in which he was a minor. The polynomial derives that boundary automatically through the intersection of the investigated period with the interval  $[t_{\text{birth}}, t_{\text{birth}} + 18 \text{ years}]$ .

(b) Conditionality for connected persons. Candidates G and J do not activate the corresponding members ( $M_6$ ,  $M_8$ ) despite the existence of a family relation, because the profile contains no transfer transaction from P to them. This demonstrates the correct implementation of the distinction between a “family member” (under § 1, item 19 Suppl. Prov. — in the circle automatically) and a “connected person” (under § 1, item 15 Suppl. Prov. — within the scope of the inspection only upon a transfer under Art. 144 ZONPI).

(c) Disjunctive structure of  $M_9$ . Candidates K and L activate  $M_9$  under different hypotheses of § 1, item 6 Suppl. Prov. — respectively letter (a) (majority share with control) and letter (d) (non-profit entity for a group of natural persons). The polynomial correctly applies the disjunctive OR logic across the four hypotheses.

### 6.4. Coverage metrics

The profile activates each of the nine members  $M_1$  to  $M_9$  at least once and tests seven critical negative cases (missing transaction, expired period, majority, exceeding the kinship limits). The total number of tested combinations is  $13 \times 9 = 117$  individual predicate evaluations, all of which produced the expected result. This satisfies the requirement of structural coverage of the rule in test validation.

## 7. Comparative analysis

### 7.1. ZKAP versus XAI (LIME, SHAP)

LIME and SHAP provide local approximations of model decisions. They answer the question “why did the model decide X?”, but do not prove that the decision was correct. ZKAP, by contrast, proves that the decision satisfies predefined legal constraints. LIME/SHAP are indicative — ZKAP is evidentiary [21].

### 7.2. ZKAP versus regulatory sandboxes

Regulatory sandboxes provide episodic testing in a controlled environment. After exit from the sandbox, compliance is not attested on an ongoing basis. ZKAP provides continuous verification of every execution cycle [20].

### 7.3. ZKAP versus verifiable computation

Classical secure-computation protocols (Yao's garbled circuits, BGW, GMW) and the verifiable-computation systems built on such techniques (e.g., Geppetto [12]) prove correctness of execution but does not integrate legal constraints into the circuit itself. ZKAP embeds the legal norms as Compliance Circuits and thereby links the correctness of the execution with correctness relative to the norm [20].



## 7.4. ZKAP versus standalone TEEs

Trusted Execution Environments (Intel SGX, AMD SEV-SNP, ARM TrustZone) [13] provide hardware isolation but do not mathematically prove the correctness of the computation. ZKAP combines TEE with SNARK proofs and Silicon Binding, so that the hardware isolation is proven cryptographically, not merely declared [20].

## 8. Discussion

### 8.1. The anti-corruption function — four mechanisms

The first is that silent non-compliance becomes impossible. Without the filter an executor can produce a result even when the prerequisites are incomplete, and control stays retrospective. With it, generation simply stops unless the executor performs an explicit override — and that override is escalated at once.

The second is that plausible deniability disappears. Because the override signal fires automatically and cannot be recalled, “I did not know” and “I did not notice” stop being available excuses.

The third concerns personal data. Since the signal carries nothing but metadata, it honours the data-minimisation rule of GDPR Art. 5(1)(c) without letting the supervisory duty fall away.

The fourth is that a result cannot be quietly reworked afterwards. Once the cryptographic commitment is in place, a decision that has already been generated cannot be readjusted without leaving a trace.

### 8.2. Applicability to agentic AI systems

The architecture fits agentic systems especially well — those that set actions in motion on their own and produce decisions with legal effects for individuals (cf. the CJEU’s SCHUFA judgment on automated decision-making [4]). In such systems the internal logic is, for practical purposes, beyond control: the inference is too complex and too adaptive to follow [17]. Filtering the output before the decision takes effect is then the one fail-safe that remains.

### 8.3. Deployment paths

The architecture is ready for piloting in three variants:

(a) As internal rules (Code of Conduct) of an individual administration — the fastest path, permitting the accumulation of operational experience.

(b) As a normative act for a specific procedure — guaranteeing maximal legal certainty and uniformity at national level.

(c) As a pilot implementation at the Commission for Personal Data Protection [19] — the CPDP already has established experience as an independent supervisory authority and is the logical first bearer of the pilot model for algorithmic accountability.

### 8.4. Limitations

This article does not answer all questions. The polynomials for the substantively more complex elements (banking analysis, property transformation, significant disparity) require separate development. The complexity of recursive SNARKs for very deep legal procedures is likewise a subject of future research. The final values of  $n_X$  and  $n_Y$  for different procedures are also subject to empirical calibration.

## 9. Conclusion and future work

The ZKAP anti-corruption output filter is Compliance-by-Design made concrete for a setting where the stakes are legal rather than merely technical. Its two moving parts — the  $X + Y$  decomposition and the cryptographically backed escalation that follows any override — together take some of the sting out of the old contradiction between what the AI Act asks for (transparency) and what the GDPR and the law of trade secrets insist on (confidentiality). The filter never judges how the model reasons internally. It checks what the model produces against legal requirements written in formal terms, and it makes sure that a

decision failing those requirements cannot slip into the legal world without a signal reaching the supervisor.

The worked example — the polynomial decomposition of a single  $Y$ -condition, the circle of investigated persons under ZONPI — shows how the filter behaves inside a real legal procedure. Run against the constructed test profile, it covers all nine members  $M_1$  to  $M_9$  and behaves correctly in the seven critical cases where a candidate should be excluded. The same principle carries over to the heavier layers of the filter — banking analysis, property transformation, fiscal comparability, significant disparity — which this paper deliberately leaves aside.

More broadly, the architecture can enter service either through the internal rules of a given administration or through a normative act covering a defined class of procedures. It works at once as an operational compliance protocol for deploying AI and as a mandatory intermediate step in the hands of the human officials who use it. It is patent-secured (BG/P/2026/114317 and BG/P/2026/114328), with EPO/PCT/UKIPO applications in preparation, and FRAND-ready for inclusion in harmonised European or international standards.

Future work is directed along three lines: (1) development of the polynomials for the more complex elements of the filter (banking analysis, property transformation, fiscal comparability, significant disparity) in standalone publications; (2) construction of a prototype with SNARK verification and Silicon Binding replacing the hash-based simulation layer; and (3) development of typified catalogues of  $X$ -positions and  $Y$ -conditions for priority procedures with high corruption risk, ready for adoption in the form of internal rules or a normative act.

## Author contributions

R. Y. Radoslavov: conceptualization, architecture and methodology of the ZKAP protocol and of the anti-corruption output filter; polynomial decomposition; legal analysis; writing of the text. R. Y. Radoslavov is the sole inventor and applicant under patent applications BG/P/2026/114317 and BG/P/2026/114328 and holds all rights in the ZKAP methodology, the filter architecture and the related patent claims.

Eng. I. Y. Getsov: engineering review of the demonstrator, execution of the test validation under Section 6, and technical editing. Co-authorship of the present article relates exclusively to the contribution so described and confers no rights in the ZKAP methodology, the filter architecture or the patent applications.

Both authors have reviewed and approved the final text and declare their agreement with the above delineation of contributions.

## 10. References

### A. Normative acts and official EU publications

- [1] Regulation (EU) 2016/679 of the European Parliament and of the Council of 27 April 2016 (General Data Protection Regulation). OJ L 119, 4.5.2016, p. 1–88. CELEX: 32016R0679.
- [2] Regulation (EU) 2024/1689 of the European Parliament and of the Council of 13 June 2024 (Artificial Intelligence Act). OJ L, 2024/1689, 12.7.2024. CELEX: 32024R1689.
- [3] Directive (EU) 2016/943 of the European Parliament and of the Council of 8 June 2016 on the protection of undisclosed know-how and business information (trade secrets). OJ L 157, 15.6.2016, p. 1–18. CELEX: 32016L0943.

### B. Case law

- [4] Court of Justice of the European Union (2023). Judgment of 7 December 2023, OQ v Land Hessen (SCHUFA Holding), Case C-634/21, ECLI:EU:C:2023:957.
- [5] Supreme Court of Cassation of the Republic of Bulgaria, General Assembly of the Civil Chamber (2023). Interpretative Decision No. 4 of 18 May 2023 in Interpretative Case No. 4/2021.

### C. National legislation of the Republic of Bulgaria

- [6] Act on the Forfeiture of Illegally Acquired Property (ZONPI; promulgated as ZPKONPI and retitled by SG No. 84 of 2023). State Gazette No. 7 of 19 January 2018; last amended SG No. 61 of 2025 (in force from 31 January 2026).

[7] Family Code of the Republic of Bulgaria. State Gazette No. 47 of 23 June 2009, subsequent amendments.

[8] Persons and Family Act of the Republic of Bulgaria. State Gazette No. 182 of 9 August 1949, subsequent amendments.

#### **D. Cryptographic and technical foundations**

[9] Goldwasser, S., Micali, S., & Rackoff, C. (1989). The Knowledge Complexity of Interactive Proof Systems. *SIAM Journal on Computing*, 18(1), 186–208.

[10] Groth, J. (2016). On the Size of Pairing-based Non-Interactive Arguments. *EUROCRYPT 2016*, LNCS 9666, Springer, pp. 305–326.

[11] Ben-Sasson, E., Bentov, I., Horesh, Y., & Riabzev, M. (2018). Scalable, transparent, and post-quantum secure computational integrity. *IACR ePrint 2018/046*.

[12] Costello, C., et al. (2015). Geppetto: Versatile Verifiable Computation. *IEEE S&P 2015*, pp. 253–270.

[13] Pinto, S., & Santos, N. (2019). Demystifying Arm TrustZone. *ACM Computing Surveys*, 51(6), Art. 130.

#### **E. Explainable AI (XAI)**

[14] Ribeiro, M. T., Singh, S., & Guestrin, C. (2016). “Why Should I Trust You?”: Explaining the Predictions of Any Classifier. *KDD 2016*, pp. 1135–1144.

[15] Lundberg, S. M., & Lee, S.-I. (2017). A Unified Approach to Interpreting Model Predictions. *NeurIPS 2017*, pp. 4765–4774.

#### **F. Legal foundations of algorithmic adjudication**

[16] Kroll, J. A., et al. (2017). Accountable Algorithms. *University of Pennsylvania Law Review*, 165(3), 633–705.

[17] Pasquale, F. (2015). *The Black Box Society*. Harvard University Press.

[18] Selbst, A. D., & Powles, J. (2017). Meaningful Information and the Right to Explanation. *IDPL*, 7(4), 233–242.

#### **G. Own publications, patents and sources**

[19] Radoslavov, R. Y. (2025). Management and Regulation of Artificial Intelligence Models: A Concept for Transparency and Accountability in Administrative Activities. *Industry 4.0, Winter Session 2025, Volume 2*, pp. 320–321. Sofia: STUME.

[20] Radoslavov, R. Y. (2026). ZKAP: Zero-Knowledge Audit Protocol — Professional White Paper for Cryptographic Regulation of Artificial Intelligence. Version 5.3, April 2026. London: Advanced Consulting London RR.

[21] Radoslavov, R. Y., & Genov, M. (2026). Beyond Transparency: How to Govern Artificial Intelligence Through Cryptographic Regulation in the Era of Opaque Algorithms. London: Advanced Consulting London RR.

[22] Patent application BG/P/2026/114317. Method and system for cryptographically bound inference execution in machine learning models with automatic generation of zero-knowledge proofs over formalized constraints (ZKAP). Filed 30.03.2026. IPC: G06F 21/64; G06N 20/00; H04L 9/32. Applicant: Radoslav Y. Radoslavov.

[23] Patent application BG/P/2026/114328. Method and system for a software implementation of a zero-knowledge audit protocol over formalized constraints, with asymmetric periodic attestation and sandbox-level prove-before-output enforcement. Filed 12.04.2026. IPC: G06F 21/64; G06N 20/00; H04L 9/32. Applicant: Radoslav Y. Radoslavov. EPO/PCT/UKIPO submissions in preparation. FRAND-ready declaration available.

[24] Radoslavov, R. Y. (2026). ZKAP — Zero-Knowledge Audit Protocol — Interactive Demonstrator. Hash-based simulation prototype; production implementation extends to SNARK verification and TEE/Silicon Binding.

# Examine of electrical conduction processes in blood vessels by cable theory

Natela Zirakashvili

I. Vekua Institute of Applied Mathematics of Iv. Javakhishvili Tbilisi State University, Georgia

natzira@yahoo.com

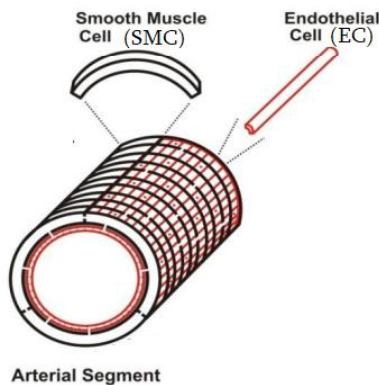
**Abstract:** Electrical conduction processes in the vasculature have traditionally been described using cable theory, i.e., locally induced signals (membrane potential) decaying passively along the arteriolar wall. The decay is typically quantified using the length-constant, derived from cable theory. While cable theory provides a useful framework for modeling electrical conduction in biological tissues, its assumptions are often violated in the context of small arteries and arterioles. Arterioles are composed of at least two cell layers: an inner endothelial cell (EC) layer and one or more outer smooth muscle cell (SMC) layers. These layers are connected by myoendothelial gap junctions (MEGJ), allowing electrical signals to pass between them. This work discusses arterioles with two cell layers and studies the change in membrane potential in the EC and SMC layers. The corresponding stationary problems are posed and solved analytically by the method of separation of variables. Numerical modeling of membrane potential propagation is performed using MATLAB software. Visualizations include isopotential contours, 2D and 3D graphs of over space and time, and plots of variation along the vessel and over time.

**Keywords:** CABLE EQUATION, MEMBRANE POTENTIAL, ARTERIOLE, ENDOTHELIAL CELL LAYERS, SMOOTH MUSCLE CELL LAYERS, SEPARATION VARIABLES METHOD

## 1. Introduction

Membrane potential  $V_m$  plays a crucial role in vascular contractility irrespective of mechanical or chemical stimulus.  $V_m$  is determined by the activity of ion channels and each cell in turn shares information with neighboring cells via gap junctions. This direct exchange of information presumably enables multiple vessel branches to coordinate their responses. Such coordination would, in theory, allow arterial structures to effectively regulate blood flow [1-3].

Arterioles consist of at least two cell layers—an endothelial cell (EC), and one or more smooth muscle cell (SMC) layers that are coupled by myoendothelial gap junctions (MEGJ). ECs are long and flat and are oriented along the vessel length axis. SMCs are spindle-shaped and wrap around ECs in a perpendicular arrangement. ECs and SMCs were modeled in an overlapping pattern, as shown in Fig. 1.



**Figure 1** Schematic drawing of a vessel segment. The vessel is composed of two cell layers, endothelial cells (ECs) innermost with smooth muscle cells (SMCs) around. ECs are oriented along the vessel axis, while SMCs wrap around ECs perpendicularly.

The current work discusses two cell-layered (EC and SMC cell layers) arterioles and studies the change in membrane potential in these layers. Numerical modeling of membrane potential propagation for a one-dimensional model of a two-cell-layered cylindrical arteriole, in the absence of current at the beginning and end of the cable (arteriole) is performed using MATLAB software. Numerical results are obtained and corresponding membrane isopotential contours, 2D and 3D graphs are presented.

## 2. Theoretical aspects

### 2.1. Problem formulation and principal formulas

Spread of  $V_m$  changes in biological cablelike structures is usually described using cable theory. One of the main problems of cable theory is the calculation of membrane potential. The theory of cables, developed in recent decades, is older than the cable equation itself, being a variation of the equations developed by Lord Kelvin to model the propagation of electrical signals from underwater telegraphs. The cable theory was originally applied to conducting potentials in the axon, for example, by Hodgkin and Rushton. It has been applied to neurons, arrays of cells [4] and to blood vessels [5,6].

The passive cable equation will be written as follows:

$$\tau_m \frac{\partial V(x,t)}{\partial t} = \lambda^2 \frac{\partial^2 V(x,t)}{\partial x^2} - V(x,t) \quad (1)$$

where  $V \equiv V_m$  is the membrane potential,  $\lambda = \sqrt{\frac{r_m}{r_l}}$  is the constant

of the space (length) of the passive cable equation which determines the distance along the cell at which the injected potential decreases by factor e, and  $\tau = r_m c_m$  is a time constant, it determines the length of time over which the injected potential decreases by factor e.  $r_m$

is membrane resistance,  $c_m$  is membrane capacity, and  $r_l$  is the resistance of the cell cytoplasm per unit length. Space and time constants are useful parameters used to measure and characterize specific properties of excitable tissues.

An important set of basic assumptions is usually made when applying cable theory to small blood vessels (for a complete description, see Holt : Holt, G. 1998. A critical reexamination of some assumptions and implications of cable theory in neurobiology. PhD thesis, California Institute of Technology, Pasadena, CA.):

1. Intra- and extracellular spaces are one-dimensional and homogeneous.
2. Electrotonic conduction is Ohmic (follows Ohm's law).
3. Membrane resistance is independent of the resting potential.
4. Ion channel conductances are time- and voltage-independent.
5. Ionic concentrations are constant.

### 2.2. Problem statement and solution

Consider a cylindrical two cell-layered arteriole of length  $L$ . Let us solve the passive cable equation (1) with the following boundary and initial conditions: 1) there is no current flowing into the cable (at the beginning of the cable) and out of the cable (at the end of the cable), and 2) at the beginning of time interval, the current is a function only of the spatial coordinate  $x$  of the cable. Thus, the boundary and initial conditions will be written as follows:

$$\begin{aligned} \text{For } x=0: V_{,x}(x,t) &= 0, \\ \text{For } x=L: V_{,x}(x,t) &= 0, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\text{For } t=0: V(x,0)=f(x). \quad (3)$$

Using the method of separation of variables and considering the boundary (2) and initial (3) conditions, we will obtain the following expression:

$$V(x,t) = \frac{2}{L} \frac{L^2}{2} + \frac{2}{L} \sum_{n=1}^{\infty} \left[ \frac{L^2}{\pi n} \sin(\pi n) + \left( \frac{L}{\pi n} \right)^2 (\cos \pi n - 1) \right] \cos\left(\frac{\pi n x}{L}\right) e^{(1-(\lambda \pi n/L)^2)t/\tau_m}$$

$$= L + 2L \sum_{n=1}^{\infty} \left( \frac{1}{\pi n} \sin(\pi n) + \frac{1}{(\pi n)^2} (\cos \pi n - 1) \right) \cos\left(\frac{\pi n x}{L}\right) e^{(1-(\lambda \pi n/L)^2)t/\tau_m},$$

$$V_{,x}(x,t) = -2 \sum_{n=1}^{\infty} \left[ \pi n \left( \frac{1}{\pi n} \sin(\pi n) + \frac{1}{(\pi n)^2} (\cos \pi n - 1) \right) \sin\left(\frac{\pi n x}{L}\right) \right] e^{(1-(\lambda \pi n/L)^2)t/\tau_m}.$$

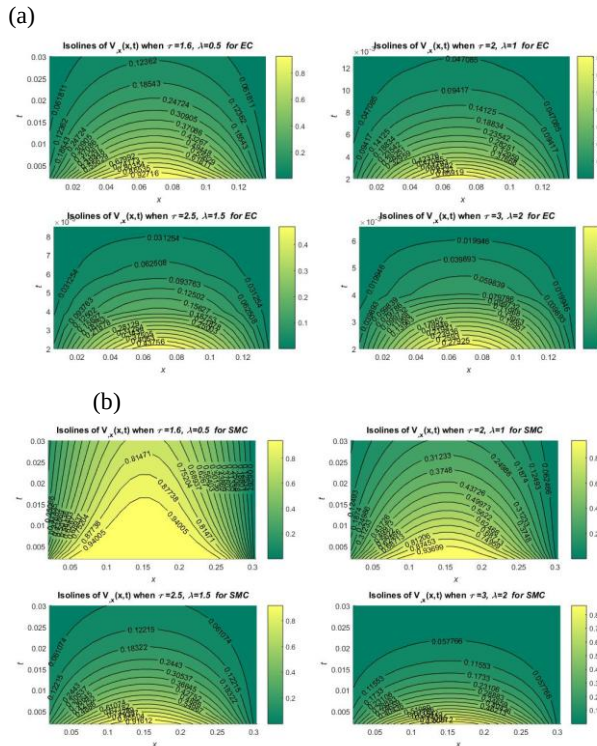
### 3. Numerical simulation

Simulations were performed for a two-layered arteriole (EC and SMC) with various values of  $\tau$  and  $\lambda$ . Example parameter sets:

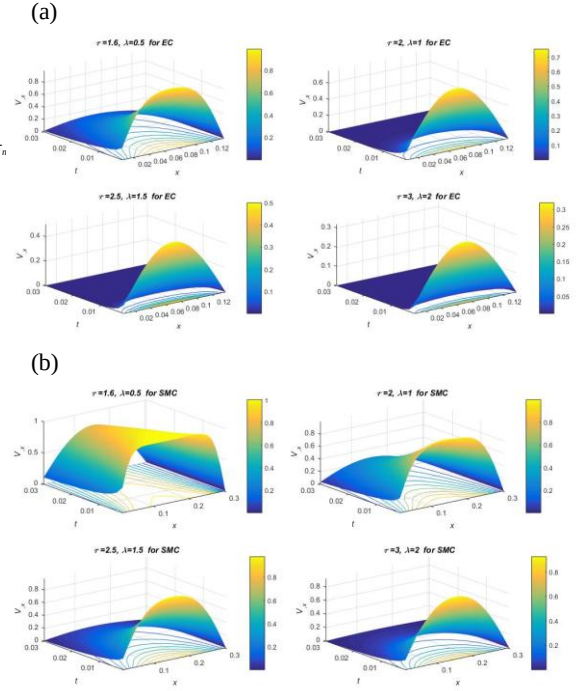
- $\tau = 1.6\text{ms}$ ,  $\lambda = 0.5\text{mm}$
- $\tau = 2\text{ms}$ ,  $\lambda = 1\text{mm}$
- $\tau = 2.5\text{ms}$ ,  $\lambda = 1.5\text{mm}$
- $\tau = 3\text{ms}$ ,  $\lambda = 2\text{mm}$ .

Arteriole length:  $L = 750\mu\text{m} = 0.75\text{mm}$ ; spatial discretization:  $\Delta x = 6\mu\text{m} = 0.006\text{mm}$ ; temporal discretization:  $\Delta t = 0.005\text{ms}$  was used. Numerical values of membrane potential change  $V_{,x}$  for various fixed temporal  $\tau$  and spatial  $\lambda$  constants and obtained during the variation of  $X$  (from  $0.006\text{mm}$  to  $0.136\text{mm}$  for EC  $0.304\text{mm}$  for SMC) and  $t$  (from  $0.01\text{ms}$  to  $0.03\text{ms}$ ) are obtained.

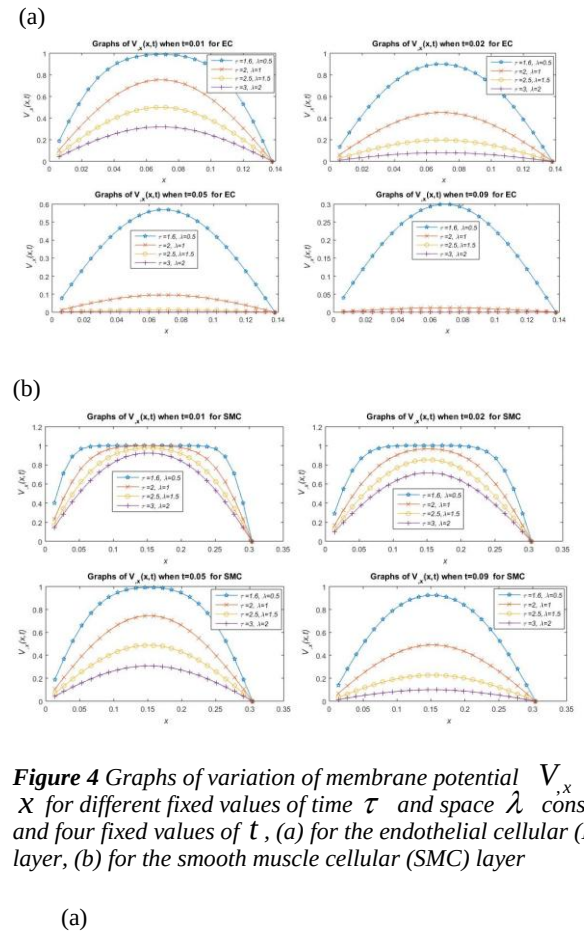
In practice, a system of contours (isolines) is often used to analyze the measurement results. For arterioles, some contours of membrane potential change  $V_{,x}$  for the plane area in the vector field of space (length)  $X$  and time  $t$  are presented.



**Figure 2** Membrane isopotential contours for different fixed values of time and space constants (a) for the endothelial cellular (EC) layer, (b) for the smooth muscle cellular (SMC) layer.

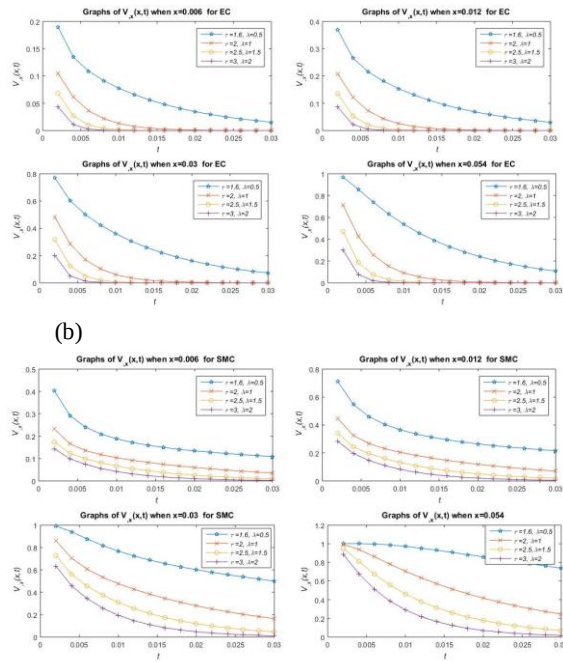


**Figure 3** 3D graphs of membrane potential change  $V_{,x}$  distribution in the  $X, t$  vector field for different fixed values of time and space constants (a) for the endothelial cellular (EC) layer, (b) for the smooth muscle cellular (SMC) layer.



**Figure 4** Graphs of variation of membrane potential  $V_{,x}$  along  $X$  for different fixed values of time  $\tau$  and space  $\lambda$  constants and four fixed values of  $t$ , (a) for the endothelial cellular (EC) layer, (b) for the smooth muscle cellular (SMC) layer





**Figure 5** Graphs of variation of membrane potential  $V_x$  along  $t$  for different fixed values of time  $\tau$  and space  $\lambda$  constants and four fixed values of  $X$ , (a) for the endothelial cellular (EC) layer, (b) for the smooth muscle cellular (SMC) layer

Results show that the change in membrane potential  $V_x$  is smaller in the EC layer than in the SMC layer, indicating poorer current propagation in SMCs.

Finally, the research has not been completed and continues to study and solve various problems in this area as far as possible.

#### 4. Conclusion

The main results presented in this paper can be formulated as follows:

- The change in membrane potential in the endothelial cell layer and the smooth muscle cell layer is studied using the passive one-dimensional cable equation (endothelial cell (EC) and smooth muscle cell (SMC) layers), for a two-cell-layered arteriole.
- For a one-dimensional model of a two-cell-layered cylindrical arteriole, in the absence of current at the beginning and end of the cable, numerical modeling is carried out using the software MATLAB. Numerical

results of the change in membrane potential are obtained, based on which membrane isopotential contours are constructed for a flat area in the vector field of length  $x$  and time  $t$ . Some 2D and 3D graphs are also built.

- From the obtained numerical results and corresponding graphs, it can be seen that the change in membrane potential  $V_x$  is smaller in the EC layer, than in the SMC layer, which is caused by poor current propagation in the SMC layer.

Cardiovascular diseases continue to be the foremost cause of mortality globally. It shall be noted, that despite of extensive research over many years, the propagation of membrane potential in blood vessels has not been comprehensively explored, therefore, its study remains an actual topic of much modern scientific research. This paper aims to study changes in membrane potential in blood vessels using the cable equation. Finally, we are continuing our research and will study and solve some of the problems in this field to the fullest extent possible.

#### 5. References

- 1) Kurjiaka, D.T., Segal, S.S.: Conducted vasodilation elevates flow in arteriole networks of hamster striated muscle. *Am. J. Physiol.* **269**, 1995, H1723-H1728.
- 2) Segal, S.S., Jacobs, T.L.: Role for endothelial cell conduction in ascending vasodilatation and exercise hyperaemia in hamster skeletal muscle. *J. Physiol.* **536**, 2002, 937-946.
- 3) Williams, D.A., Segal, S.S.: Feed artery role in blood flow control to rat hindlimb skeletal muscles. *J. Physiol.* **463**, 631-646 (1993).
- 4) Fall, C.P., Marland, E.S., Tyson, J.J., editors. *Computational Cell Biology*. Springer-Verlag, New York 2002
- 5) Kapela, A., S. Nagaraja, and N. M. Tsoukias. 2010. A mathematical model of vasoreactivity in rat mesenteric arterioles. II. Conducted vasoreactivity. *Am. J. Physiol. Heart Circ. Physiol.* **298**, 2010, H52-H65.
- 6) Crane, G. J., M. L. Hines, and T. O. Neild. 2001. Simulating the spread of membrane potential changes in arteriolar networks. *Microcirculation*. **8**, 2001, 33-43.

# Моделиране и изследване на дифракционното поле от дрон с използване на Фурие трансформация

Иван Гарванов<sup>1,2</sup>, Магдалена Гарванова<sup>1</sup>, Мария Миндова<sup>1</sup>, Деян Дънешки<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Университет по библиотекознание и информационни технологии, София, България

<sup>2</sup>Институт по математика и информатика – Българска академия на науките, София, България

<sup>3</sup>Технически университет, София, България

i.garvanov@unibit.bg, m.garvanova@unibit.bg, mmindova@yahoo.com, ddaneshki@gmail.com

**Резюме:** В настоящата статия е представен и изследван математически и симулационен дифракционен модел на дрон, облъчен с радиосигнал, в близката (Френел) и далечната (Фраунхофер) зона на наблюдение. Моделирането на дифракционната картина е реализирано чрез двумерна Фурие трансформация, базирана на принципа на Бабинет и интегралното решение на Рейли-Зомерфелд. Анализирани са зависимостите между геометричните параметри на обекта, разстоянието до приемника и дължината на вълната. Разработеният модел осигурява висока точност и гъвкавост, като намира пряко приложение при изследване на ефекта на пряко разсейване (Forward Scattering) в бистатични радарни системи, както и при решаване на обратната задача за откриване и разпознаване на движещи се обекти.

**Ключови думи:** дифракционен модел, дрон, Фурие трансформация, Френелова и Фраунхоферова дифракция, бистатичен радар

## 1. Въведение

Дифракцията е явление, което води до отклонение на вълните сигнали от праволинейното им разпространение, когато преминават през отвор или срещнат препятствие по пътя си на разпространение [1]. Тя се наблюдава при всички видове вълни, включително звукови, електромагнитни, светлинни, радиовълни и рентгенови лъчи. Според принципа на Бабинет, дифракционната картина на непрозрачен обект е идентична с дифракционната картина на отвор със същата форма и размер, но интензитетът на сигнала е с обратна стойност [2].

Принципът на Бабинет е в основата на явлението *пряко разсейване на сигнала* (Forward Scattering), използвано в бистатичния радар за откриване на движещи се обекти, пресичащи базовата линия между приемника и предавателя [3-9]. Според принципа на Хюйгенс-Френел, когато фронтът на светлинния лъч достигне отвор, всяка от неговите точки се превръща в източник на сферична вълна. Генерираните множество вълни са кохерентни и докато се разпространяват, тези вълни се сумират или изваждат, което води до редуващи се тъмни и светли дифракционни ленти. При наличие на бариера се наблюдава дифракционен ефект на светлинни лъчи, попадащи в геометричната сянка на тялото, и Поасоново петно в центъра на дифракционната картина [10].

Зоната зад препятствието, до която вълната не достига, се нарича *сянка*. Размерът на сянката зависи от размера на препятствието и дължината на вълната на сигнала. Ако дължината на вълната е много голяма в сравнение с това препятствие, тогава почти няма зона на сянка. Видът на дифракционната картина зависи значително от връзката между размера на препятствието, дължината на вълната  $\lambda$  и разстоянието от препятствието до точката на наблюдение  $z$ . В тази връзка се разграничават два вида дифракция: 1. *Френелова дифракция*, когато върху препятствието пада плоска или сферична вълна и на екрана се наблюдава дифракционна картина, състояща се от концентрични кръгове. В този случай точката на наблюдение е разположена на кратко разстояние от препятствието, така че вълновият фронт, падащ върху екрана за наблюдение, е сферичен. 2. *Фраунхоферова дифракция* или дифракция на паралелен лъч възниква, когато плоска вълна падне върху препятствие. Тази дифракционна картина се наблюдава на относително голямо разстояние от препятствието до екрана, така че вълновият фронт, достигащ до точката на наблюдение, е плосък.

В тази статия се разглежда дифракционната картина на дрон, облъчен с радиосигнал. Изследванията са проведени в близката (зона на Френел) и далечната (зона на Фраунхофер) зона на дифракционното поле. Изследвани са зависимостите

между параметрите на дрона, разстоянието от обекта до приемника и дължината на вълната на радиосигнала.

Статията е организирана по следния начин: В раздел 2 е представен алгоритъм за преобразуване на Фурие. В раздел 3 е обсъдена дифракцията на Френел и Фраунхофер. В раздел 4 са получени и анализирани резултати от моделирането. Накрая, в раздел 5 са направени изводи и препоръки за бъдещи изследвания.

## 2. Фурие трансформация

Двумерното преобразуване (трансформация) на Фурие за непрекъсната функция  $f(x, y)$  се дефинира със следния интегрален израз:

$$F(f_x, f_y) = \iint_{-\infty}^{+\infty} f(x, y) \exp[-j2\pi(f_x x + f_y y)] dx dy \quad (1)$$

Където  $f_x$  и  $f_y$  са пространствените честоти, съответстващи на пространствените координати  $x$  и  $y$ , а  $j = \sqrt{-1}$  е имагинерната единица.

Преобразуването на Фурие може да се запише и в съкратен вид чрез оператора  $\mathcal{F}$ :

$$F(f_x, f_y) = \mathcal{F}\{f(x, y)\} \quad (2)$$

Обратното преобразуване на Фурие се представя с изрази:

$$f(x, y) = \iint_{-\infty}^{+\infty} F(f_x, f_y) \exp[j2\pi(f_x x + f_y y)] df_x df_y \quad (3)$$

Съкратената форма на обратното преобразуване има вида:

$$f(x, y) = \mathcal{F}^{-1}\{F(f_x, f_y)\} \quad (4)$$

Връзката между правото и обратното преобразуване се изразява чрез последователното прилагане на двата оператора:

$$f(x, y) = \mathcal{F}^{-1}\{\mathcal{F}\{f(x, y)\}\} \quad (5)$$

Фундаментално свойство на трансформацията на Фурие е теоремата за конволюцията, която гласи, че конволюцията на две функции в пространствената област съответства на точково умножение в честотната област:

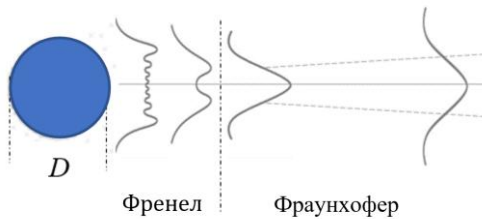
$$\mathcal{F}\left\{\iint_{-\infty}^{+\infty} f(\zeta, \eta) h(x - \zeta, y - \eta) d\zeta d\eta\right\} = \mathcal{F}\{f(x, y)\} \mathcal{F}\{h(x, y)\} = F(f_x, f_y) H(f_x, f_y) \quad (6)$$

## 3. Дифракционен модел

Когато непрозрачен обект бъде осветен с плоска вълна, светлината зад него се разпространява в резултат на явлението *дифракция*. Ако екранът (равнината) за наблюдение е разположен на достатъчно голямо разстояние от дифракционния обект, дифракционната картина запазва формата си и при по-нататъшно отдалечаване променя единствено своя мащаб (размер). Това състояние се дефинира

като *дифракция на Фраунхофер*. Когато екранът за наблюдение е разположен по-близо до обекта, дифракционната картина променя формата си при промяна на разстоянието. Това явление се нарича *дифракция на Френел*.

В непосредствена близост до обекта се намира близката зона (зона на Френел), а в отдалечената област е далечната зона (зона на Фраунхофер) (Фиг. 1). В зоната на Фраунхофер разпределението на интензитета на светлината се описва чрез трансформация на Фурие.



Фиг. 1 Видове дифракции

Критерият, който определя типа на дифракцията, се основава на числото на Френел:

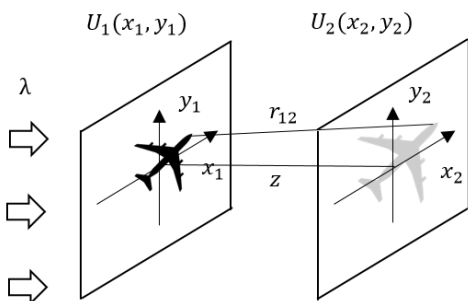
$$\frac{\omega^2}{\lambda z} \begin{cases} \ll 1 & \text{Дифракция на Фраунхофер} \\ \approx 1 & \text{Дифракция на Френел} \\ \gg 1 & \text{Геометрична сянка} \end{cases} \quad (7)$$

Където  $\omega$  е най-големият размер в обекта,  $\lambda$  е дължината на вълната на приетата монохроматична светлина, а  $z$  е разстоянието между равнината на обекта и равнината на наблюдение.

На Фиг. 2 е представена равнината на източника (обекта) с разпределение на комплексната амплитуда на полето  $U_1(x_1, y_1)$ . Основната цел е да се пресметне разпространеният сигнал  $U_2(x_2, y_2)$  в равнината на наблюдение, а оттам и неговият интензитет. За определяне на полето в равнината на наблюдение се прилага принципът на Хюйгенс-Френел, според който всяка точка от равнината на източника се разглежда като вторичен източник на сферични вълни. Чрез интегриране по цялата повърхност се получава първото интегрално решение на Рейли-Зомерфелд:

$$U_2(x_2, y_2) = \iint_{-\infty}^{+\infty} U_1(x_1, y_1) \frac{z}{j\lambda} \frac{e^{jk r_{12}}}{r_{12}^2} dx_1 dy_1 \quad (8)$$

Където  $r_{12}$  е разстоянието между точката от равнината на източника и точката в равнината на наблюдение, където се изчислява отговорът. Общият отговор в точка от равнината на наблюдение е суперпозиция на отговорите на всеки „елементарен източник“.



Фиг. 2 Схема на падаща плоска вълна, перпендикулярна на непрозрачен обект, създаваща дифракционна картина на разстояние  $z$

Точният израз на  $r_{12}$  е:

$$r_{12} = \sqrt{z^2 + (x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \quad (9)$$

След това можем да апроксимираме израза само с първите два члена:

$$r_{12} \approx z \sqrt{1 + \frac{(x_2 - x_1)^2}{z^2} + \frac{(y_2 - y_1)^2}{z^2}} \quad (10)$$

Точният израз за  $r_{12}$  съдържа квадратен корен, което прави прекомерно трудно и числено нестабилно директното изчисление на интеграла (8). Поради това се въвеждат физически обосновани приближения – приближение на Френел и приближение на Фраунхофер.

### 3.1 Апроксимация на Френел

Изразът на  $r_{12}$  се получава чрез използване на разлагането на Тейлър и игнориране на членовете с порядък по-голям от три, тъй като те са пренебрежимо малки [11, 12]. В близката дифракционна зона можем да приемем, че  $r_{12} = z$ , но за израза  $e^{jk r_{12}}$  използваме уравнение (3), защото експонентата е много чувствителна към  $r_{12}$ . По този начин се получава интегралът на Френел:

$$U_2(x_2, y_2) = \frac{e^{jkz}}{j\lambda z} \iint_{-\infty}^{+\infty} U_1(x_1, y_1) \cdot \exp \left\{ \frac{jk}{2z} [(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2] \right\} dx_1 dy_1 \quad (11)$$

Този израз показва, че разпространяващото се вълново поле може да се разглежда като параболична (или сферична) вълна. За разлика от дифракцията на Фраунхофер, тук се отчита кривината на вълновия фронт.

Уравнение (11) може да се запише във формата на конволюционен интеграл:

$$U_2(x_2, y_2) = \iint_{-\infty}^{+\infty} U_1(x_1, y_1) h(x_2 - x_1, y_2 - y_1) dx_1 dy_1 \quad (12)$$

Където  $h(x_2, y_2)$  е импулсен отговор на свободното пространство:

$$h(x_2, y_2) = \frac{e^{jkz}}{j\lambda z} \exp \left[ \frac{jk}{2z} (x_2^2 + y_2^2) \right] \quad (13)$$

Алтернативно, интегралът на Френел може да се изрази чрез двумерна Фурие трансформация след разкриване на скобите във фазовия член:

$$U_2(x_2, y_2) = \frac{e^{jkz}}{j\lambda z} \exp \left( \frac{j\pi}{\lambda z} (x_2^2 + y_2^2) \right) \cdot \iint_{-\infty}^{+\infty} U_1(x_1, y_1) \exp \left[ \frac{-j2\pi}{\lambda z} (x_1 x_2 + y_1 y_2) \right] \exp \left[ \frac{j\pi}{\lambda z} (x_1^2 + y_1^2) \right] dx_1 dy_1 \quad (14)$$

Полученият интегрален израз всъщност е преобразуване на Фурие със заместване на пространствените честоти:

$$f_x \rightarrow \frac{x_2}{\lambda z} \text{ и } f_y \rightarrow \frac{y_2}{\lambda z} \quad (15)$$

Чрез оператора за Фурие трансформация  $\mathcal{F}$ , израз (14) се записва като:

$$U_2(x_2, y_2) = \frac{e^{jkz}}{j\lambda z} \exp \left( \frac{j\pi}{\lambda z} (x_2^2 + y_2^2) \right) \cdot \mathcal{F} \left\{ U_1(x_1, y_1) \exp \left[ \frac{j\pi}{\lambda z} (x_1^2 + y_1^2) \right] \right\} \quad (16)$$

В честотната област конволюцията (12) преминава в произведение съгласно теоремата за конволюцията. Предавателната функция  $H(f_x, f_y)$  (Фурие образът на  $h$ ) е:

$$H(f_x, f_y) = \mathcal{F}\{h(x_2, y_2)\} = e^{jkz} e^{-j\pi\lambda z (f_x^2 + f_y^2)} \quad (17)$$

Което позволява пресмятане на полето чрез бърза трансформация на Фурие (FFT):

$$U_2(x_2, y_2) = \mathcal{F}^{-1} \{ \mathcal{F}\{U_1(x_1, y_1)\} H(f_x, f_y) \} \quad (18)$$

### 3.2 Апроксимация на Фраунхофер

Фраунхоферовата апроксимация, известна още като *апроксимация на далечното поле*, предполага много далечна равнина на наблюдение [13, 14]. При много големи разстояния  $z$  (далечна зона) е изпълнено условието:

$$z \gg \left( \frac{\pi(x_1^2 + y_1^2)}{\lambda} \right)_{\max} \quad (19)$$

Това означава, че квадратичният фазов член в интеграла става незначителен:

$$\exp\left[\frac{j\pi}{\lambda z}(x_1^2 + y_1^2)\right] \approx 1 \quad (20)$$

Прилагането на това условие върху (14) води до апроксимацията на Фраунхофер:

$$U_2(x_2, y_2) = \frac{e^{jkz}}{j\lambda z} \exp\left[\frac{j\pi}{\lambda z}(x_2^2 + y_2^2)\right].$$

$$\iint_{-\infty}^{\infty} U_1(x_1, y_1) \exp\left[\frac{-j2\pi}{\lambda z}(x_1 x_2 + y_1 y_2)\right] dx_1 dy_1 \quad (21)$$

Изразът (21) е чиста двумерна Фурие трансформация на входното поле  $U_1(x_1, y_1)$ , оценена в честотите:

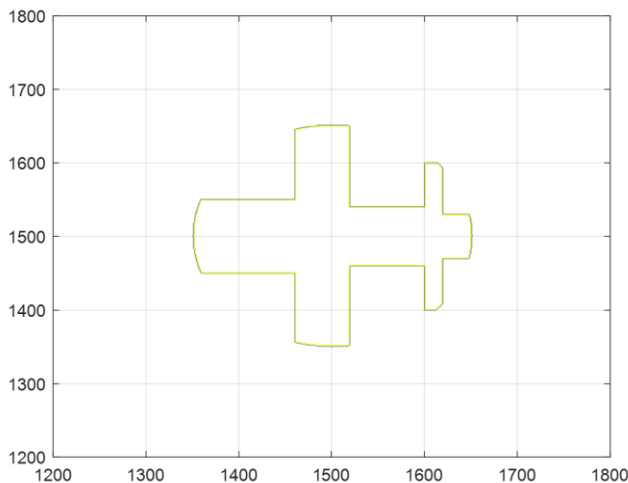
$$f_X \rightarrow \frac{x_2}{\lambda z} \text{ и } f_Y \rightarrow \frac{y_2}{\lambda z} \quad (22)$$

В симулационните системи изборът на апроксимация на Френел или Фраунхофер се прави автоматично въз основа на пресмятането на числото на Френел:

$$U_2(x_2, y_2) = \frac{e^{jkz}}{j\lambda z} \exp\left[\frac{j\pi}{\lambda z}(x_2^2 + y_2^2)\right] \cdot \mathcal{F}\{U_1(x_1, y_1)\} \\ U_2(x_2, y_2) = \text{const.} \cdot \mathcal{F}\{U_1(x_1, y_1)\} \quad (23)$$

#### 4. Резултати

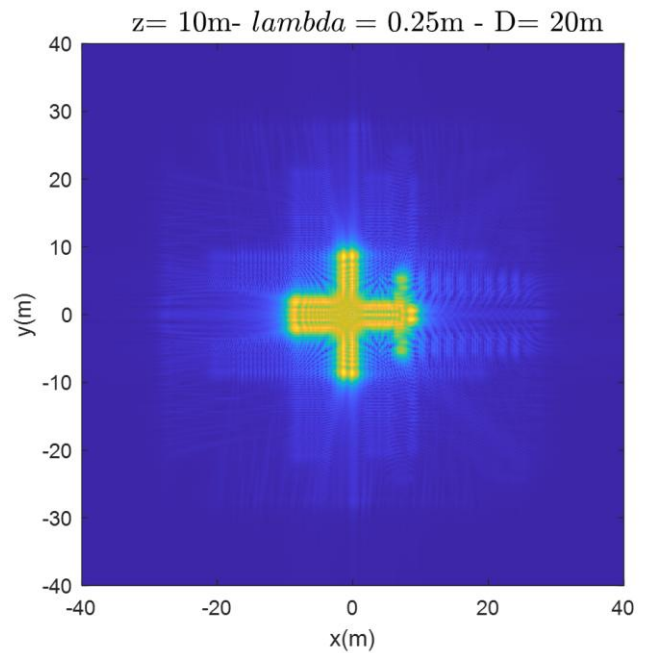
За проверката и валидирането на разработения дифракционен модел са проведени числени симулации с непрозрачен обект с форма на дрон, оразмерен в координатна система (Фиг. 3). Изследвано е разпространението на монохроматична плоска вълна с дължина  $\lambda = 0.25 \text{ m}$  ( $1.2 \text{ GHz}$ ), падаща перпендикулярно спрямо обекта. Външните габаритни размери на обекта са  $D = 20 \text{ m}$ . Симулационните експерименти са извършени за три разстояния между обекта и равнината на наблюдение:  $z = 10, 100$  и  $1000 \text{ m}$ , съответстващи на различни стойности на числото на Френел.



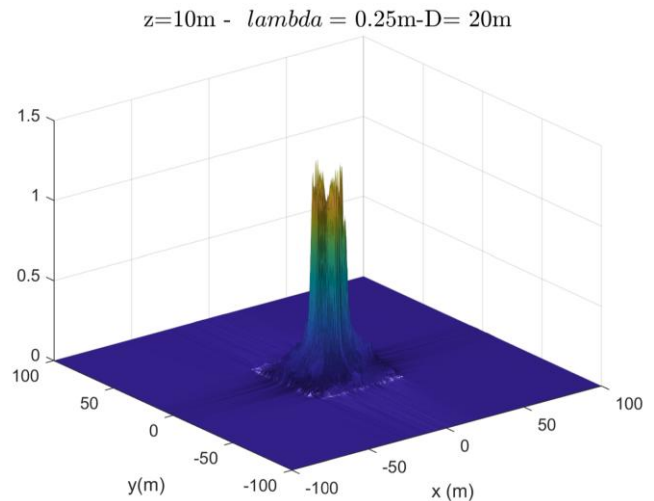
Фиг. 3 Модел на дрон

##### 4.1. Анализ в близката зона ( $z = 10 \text{ m}$ )

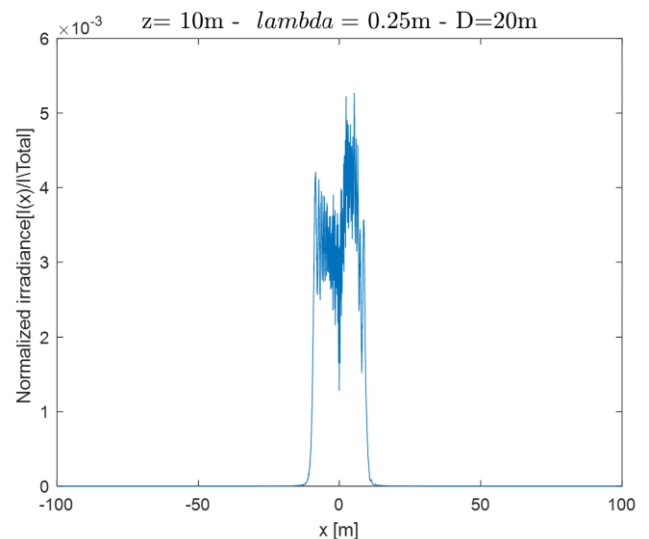
При разстояние между обекта и равнината на наблюдение  $z = 10 \text{ m}$  числото на Френел удовлетворява условието  $D^2/\lambda z \gg 1$ , което определя наблюдението в близка зона (зона на геометрична сянка). На Фиг. 4 и Фиг. 5 са показани резултатите от 2D и 3D дифракционния модел. В тази зона дифракционната картина запазва ясни геометрични контури, съответстващи на оригиналния силует на дрона. Наблюдава се характерната за Френеловата дифракция висока осцилация на интензитета по ръбовете на тялото. На Фиг. 6 е показан интензитетът на напречен профил, откъдето се виждат флукуациите с висока честота в централната част (геометричната сянка), дължащи се на интерференцията от вторичните вълнови източници.



Фиг. 4 Дифракционен модел на дрон на разстояние 10 м.



Фиг. 5 3D дифракционен модел на дрон на разстояние 10 м.

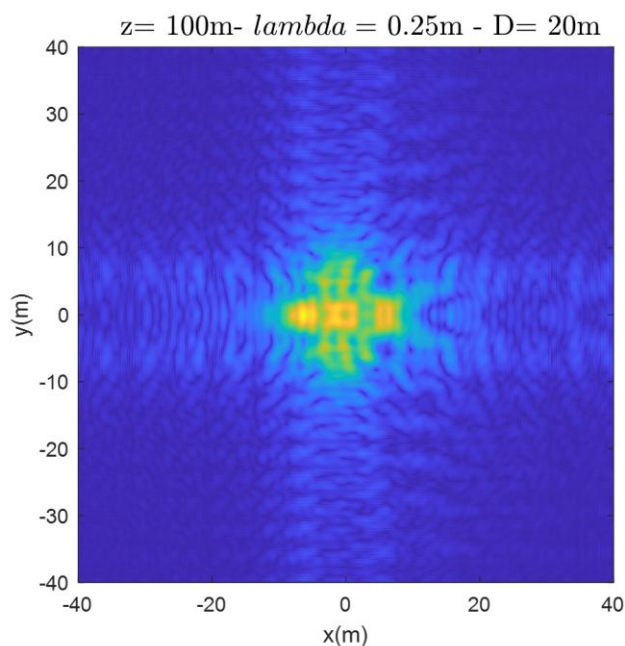


Фиг. 6 Профил на дифракционен модел на дрон на разстояние 10 м.

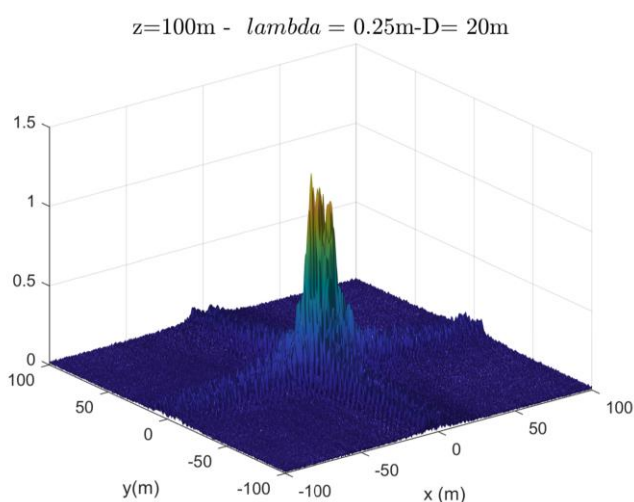


#### 4.2. Анализ в преходната зона ( $z = 100$ m)

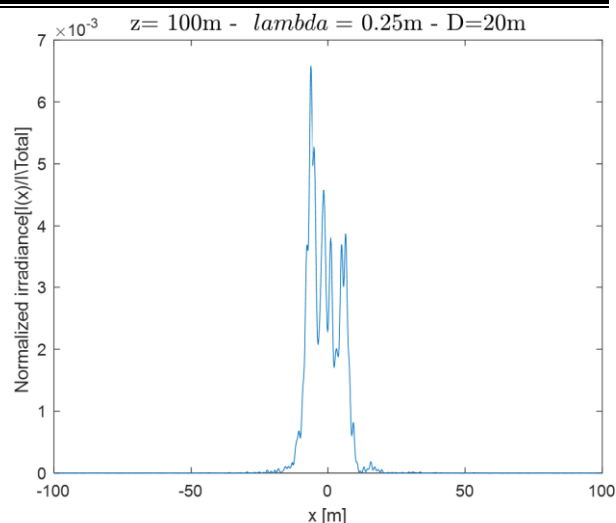
С увеличаване на разстоянието до  $z = 100$  m сферичната кривина на вълновия фронт започва да намалява, а числото на Френел се доближава до единица ( $D^2/\lambda z = 16$ ). На Фиг. 7 и Фиг. 8 са показани резултатите от 2D и 3D дифракционния модел, откъдето се вижда размиване на контура. Острите геометрични граници на дрона започват да се размиват. Забелязва се плавен преход на енергията към страничните максимуми. На Фиг. 9 е показан профилът на интензитета на полето, откъдето ясно се виждат преразпределените максимуми. Флуктуациите в сянката са с по-голяма амплитуда и по-ниска пространствена честота спрямо случая при  $z = 10$  m.



Фиг. 7 Дифракционен модел на дрон на разстояние 100 м.



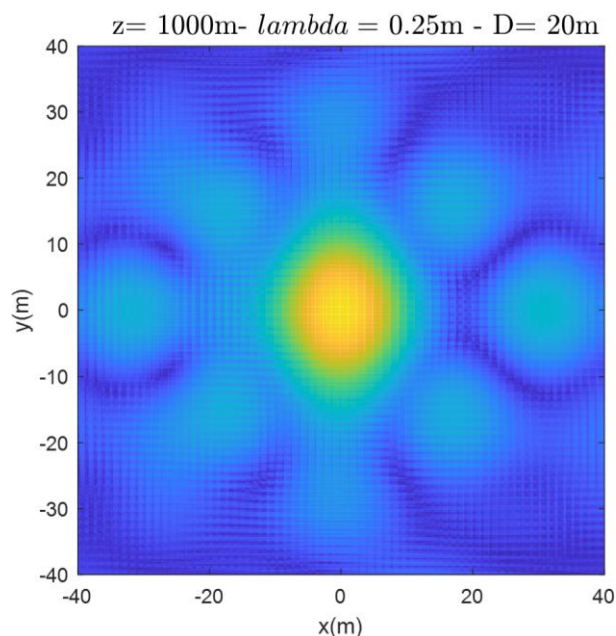
Фиг. 8 3D дифракционен модел на дрон на разстояние 100 м.



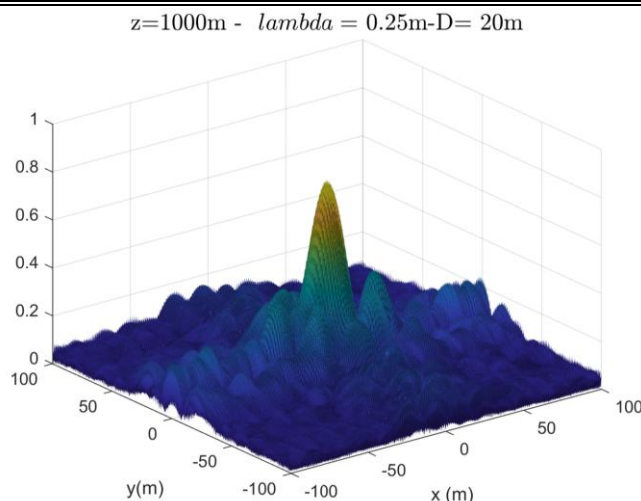
Фиг. 9 Профил на дифракционен модел на дрон на разстояние 100 м.

#### 4.3. Анализ в далечната зона ( $z = 1000$ m)

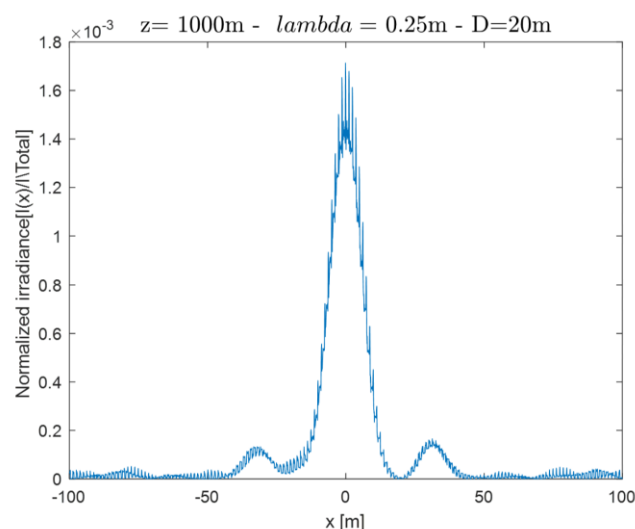
При  $z = 1000$  m се достига условието за Фраунhoferова дифракция ( $D^2/\lambda z = 1.6$ ). На Фиг. 10 и Фиг. 11 са показани резултатите от 2D и 3D дифракционния модел, откъдето се вижда трансформацията на изображението. Дифракционната картина вече не съответства на геометричния силует на дрона, а представлява неговия двумерен честотен спектър (Фурие образ). В центъра се оформя силно изразен главен максимум (Пواسоново петно / централен сноп на пряко разсейване). На Фиг. 12 е показано енергийното разпределение на профила на полето, което придобива форма близка до функцията  $\text{sinc}$ , с характерни странични максимуми. Централният връх концентрира основната част от разсеяната енергия, което е ключово за откриване на обекти в бистатични радарни системи с пряко разсейване (Forward Scattering Radar).



Фиг. 10 Дифракционен модел на дрон на разстояние 1000 м.



Фиг. 11 3D дифракционен модел на дрон на разстояние 1000 м.



Фиг. 12 Профил на дифракционен модел на дрон на разстояние 1000 м.

Получените резултати потвърждават, че двумерната Фурие трансформация чрез FFT осигурява висока точност, числена стабилност и висока скорост при изчисление на дифракционните картини. Въпреки това при интерпретацията на резултатите трябва да се отчитат следните физически приближения:

**Монохроматичност:** Използваният модел приема идеално монохроматична вълна (нулева честотна лента и безкрайно време на кохерентност). В реални условия радарните сигнали притежават крайна честотна лента, което води до частично изглаждане на интерференционните минимума и максимуми.

**Скаларно приближение:** Вълновото поле се описва скаларно, пренебрегвайки поляризационните ефекти при взаимодействие с реалната триизмерна повърхност и материал на дрона.

## 5. Заключение

В настоящата статия е разработен дифракционен модел за изследване на електромагнитното поле около непрозрачен обект с форма на дрон. Използването на двумерната Фурие трансформация позволява ефективно симулиране и анализ на дифракционните картини както в близката (зона на Френел), така и в далечната (зона на Фраунхофер) зона на наблюдение. Резултатите потвърждават, че моделът може да бъде използван като надежден инструмент за изследване на ефекта на пряко разсейване (Forward Scattering) в бистатични сензорни системи. В бъдеще разработеният подход може да се разшири за решаване на обратната задача – възстановяване на формата,

геометрията и пространственото положение на обекта въз основа на получената дифракционна картина.

**Благодарности:** Статията е реализирана по проект „Иновативни методи и алгоритми за откриване и разпознаване на подвижни обекти чрез интегриране на хетерогенни данни“, КП-06-Н 72/4/05.12.2023, финансиран от ФНИ-МОН.

## 6. Литература

1. Cowley J., (1975) Diffraction physics (North-Holland, Amsterdam), ISBN 0-444-10791-6.
2. Jimenez J., Hita E., (2001) Babinet's principle in scalar theory of diffraction, Opt. Rev. 8, pp. 495-497.
3. Garvanov I., Kabakchiev C., Behar V., and Garvanova M., (2015) Target detection using a GPS Forward-Scattering Radar, Int. Conf. Engineering & Telecommunications, Moscow-Dolgoprudny, Russia, pp. 29-33. doi: 10.1109/EnT.2015.20
4. Garvanov I., Kabakchiev C., Behar V., and Garvanova M., (2016) The experimental study of possibility for pulsar signal detection, Int. Conf. Engineering & Telecommunications, Moscow-Dolgoprudny, Russia, pp. 68-72. doi: 10.1109/EnT.2016.021
5. Garvanov I., Garvanova M., and Kabakchiev C., (2019) Pulsar signal detection and recognition, Int. Conf. on Telecommunications and Remote Sensing, ICTRS, Rhodes, Greece, pp. 30-34. doi: 10.1145/3357767.3357771
6. Garvanov I., Kabakchiev H., Behar V., Garvanova M., and Iyimbor R., (2019) On the modeling of innovative navigation systems, Business Modeling and Software Design, Lecture Notes in Business Information Processing, vol. 356. Springer, Cham, pp. 299-306. doi: 10.1007/978-3-030-24854-3\_23
7. Garvanova M., Shishkov B., and Vladimirov S., (2018) Mobile devices – effect on human health. Proc. of the International Conference on Telecommunications and Remote Sensing, Barcelona, Spain, pp. 101-104. doi: 10.1145/3278161.3278176.
8. Ganci S., (2005) Fraunhofer diffraction by a thin wire and Babinet's principle, American Journal of Physics 73, 83. doi.org/10.1119/1.1791274
9. Goodman J., (1968) Introduction to Fourier Optics, McGraw-Hill, New York, pp. 57-62.
10. Vaillant De Guélis T., Shcherbakov V., Schwarzenböck A., (2019) Diffraction patterns from opaque planar objects simulated with Maggi-Rubinowicz method and angular spectrum theory, OPTICS EXPRESS 9372, vol. 27, No. 7. doi.org/10.1364/OE.27.009372
11. Garvanov, I., Garvanova, M., (2024) Diffraction Model of Electromagnetic Wave, 23rd International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies (SIELA), Bourgas, Bulgaria, 2024, pp. 1-4. doi: 10.1109/SIELA61056.2024.10637859
12. Shishkov, B., Garvanova, G. (2023). A Review of Pilotless Vehicles. In: Shishkov, B., Lazarov, A. (eds) Telecommunications and Remote Sensing. ICTRS 2023. Communications in Computer and Information Science, vol. 1990. https://doi.org/10.1007/978-3-031-49263-1\_11
13. Garvanov I., Kabakchiev, C., Garvanova, M., Borissova, D., Dimitrov G., (2020) Diffraction Models from Opaque Objects Simulated by Fourier Transform, ACM International Conference Proceeding Series17 October 2020, ICTRS 2020: Proceedings of the 9th International Conference on Telecommunications and Remote Sensing, October 2020, pp. 24–29. https://doi.org/10.1145/3430116.3430121
14. Garvanov, I., Garvanova, M., Borissova, D., Garvanova, G., (2023) A model of a multi-sensor system for detection and tracking of vehicles and drones. In: B. Shishkov (Ed.), Business Modeling and Software Design. BMSD 2023. Lecture Notes in Business Information Processing, vol. 483, pp. 299-307. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-031-36757-1\_21

# Сравнителен анализ на алгоритми за възстановяване на разфокусирани изображения

Магдалена Гарванова

Университет по библиотекознание и информационни технологии, София, България

m.garvanova@unibit.bg

**Резюме:** Нежеланото трептене на камерите по време на заснемане е сред основните причини за размазване на изображенията. В настоящата статия е изследвано влиянието на грешките при оценката на функцията на разсейване на точката (PSF) върху качеството на възстановеното изображение. За оценяване на PSF се използва модел, базиран на данни от инерциални сензори за движение (акселерометри и жирокопи). Направена е съпоставка между четири утвърдени алгоритъма за деконволюция, а именно: филтрация на Винер, итеративен алгоритъм на Ричардсон-Луси, регуларизация на Тихонов и сляпа деконволюция (SSIM) при различни нива на отношението сигнал/шум ( $SNR=5$  dB и  $SNR=15$  dB). Резултатите показват, че предварителното изглаждане на измерената PSF и намаляването на шума значително подобряват точността на възстановяване.

**Ключови думи:** възстановяване на изображения, деконволюция, размазване от движение, филтър на Винер, алгоритъм на Ричардсон-Луси, регуларизация на Тихонов, сляпа деконволюция

## 1. Въведение

Цифровата обработка на изображения и компютърното зрение играят ключова роля в съвременните системи за заснемане, мобилни устройства, медицинска диагностика и системи за сигурност. Един от основните проблеми, който влошава качеството на цифровото изображение при заснемане в реални условия, е размазването, предизвикано от движение и трептене на камерата (motion blur / camera shake). Нежеланите трептения на ръката на оператора по време на продължителна експозиция водят до влошаване на качеството на изображението, губейки фини детайли и контури.

От математическа гледна точка, процесът на деконволюция и възстановяване на размазано изображение без предварително известна информация за смущението е математически некоректно поставена задача [1]. Тъй като съществува безкраен брой двойки от оригинални изображения и функции на разсейване на точката (Point Spread Function – PSF), водещи до едно и също наблюдавано размазано изображение, традиционните алгоритми разчитат на априорни предположения за статистиката на естествените изображения или итеративни подходи за оценяване на PSF [2]. Класически подходи като вариационните методи на Фергъс и колектив [3] прилагат статистическа обработка и вероятностни модели върху градиентите на изображението. Въпреки това чистите софтуерни методи за сляпа деконволюция (blind image deconvolution) често са изчислително тежки, бавни и силно чувствителни към шума в изображението.

За преодоляване на тези ограничения през последните години активно се развива концепцията за сензорно-асистирано възстановяване на изображения. В изследванията си Джоши и колектив [4] и Шинделар и Шроубек [5] показват, че интегрирането на хардуерни данни от инерциални сензори (Inertial Measurement Units – IMU) като триосни акселерометри и жирокопи позволява директно проследяване на пространствената траектория на камерата по време на заснемане. Използването на физически измерени данни за ъгловата скорост и ускорението осигурява значително по-надеждно и бързо възстановяване на размазващата матрица – PSF [4, 5].

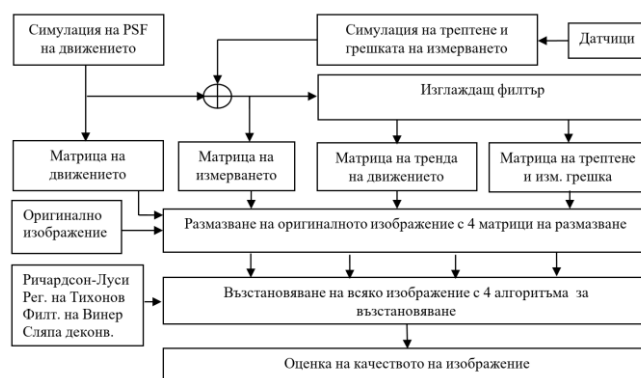
Въпреки предимствата на инерциално-базираната оценка на PSF, физическите сензори въвеждат собствен шум, измервателни грешки и калибровъчни отклонения [4]. Неточностите при измерването на трептенето на камерата водят до изкривяване на оценената PSF, което при последващата деконволюция причинява влошаване на качеството на възстановения образ [6]. Поради тази причина от ключово значение е прилагането на подходящи методи за предварително филтриране и изглаждане на измерените сензорни данни, както и изследването на устойчивостта на различните класически алгоритми за възстановяване (напр. филтрация на Винер, алгоритъм на Ричардсон-Луси,

регуларизация на Тихонов и итеративна сляпа деконволюция [7, 8]) при различни нива на отношението сигнал/шум (SNR) [8, 9].

Настоящото изследване е насочено към симулационно моделиране и сравнителен анализ на четири утвърдени алгоритъма за деконволюция при използване на сензорно-оценена PSF. В статията се изследва влиянието на шума и трептенето върху точността на възстановяване, като се оценява ефектът от предварителното изглаждане на PSF чрез обективните метрики за качество MSE (Mean Squared Error) и SSIM (Structural Similarity Index) [1].

## 2. Алгоритъм за изследване на процеса на възстановяване на изображения

Блок-схемата на прилагания експериментален алгоритъм за изследване е представена на Фиг. 1. За определяне на размазващата матрица  $A$  (функцията на разсейване на точката – PSF) се използва подход, базиран на данни от инерциални сензори (акселерометри и жирокопи), които отчитат движението на камерата в пространството.



**Фиг. 1** Блок-схема на алгоритъма за изследване на процеса на възстановяване

При симулационното реализиране на алгоритъма се използва математическо описание на PSF, съответстващо на пространственото преместване на камерата. Към теоретичната PSF на движението се добавя грешка, имитираща трептенето на камерата и измервателния шум на сензорите.

Резултатната (измерена) PSF се подава на входа на изглаждащ филтър, чрез който се извършва филтрация за отделяне на основния тренд на движението от случайната грешка. На тази база се дефинират четири типа параметрични PSF и съответните им размазващи матрици:

1. *Motion PSF* – теоретична PSF на движението на камерата (идеален случай без измервателен шум);
2. *Measured PSF* – сурова измерена PSF, включваща движението, трептенето и измервателната грешка;
3. *Smoothed PSF* – изгладена PSF след преминаване през изглаждащия филтър (отделен тренд на движението);
4. *Noise PSF* – PSF, съдържаща единствено компонентата на измервателната грешка и трептенето на камерата.

С така генерираните четири матрици се извършва симулирано размазване на оригиналното изображение. Всяко от получените размазани изображения впоследствие се възстановява чрез четирите изследвани алгоритъма за деконволюция:

- Алгоритъм на Ричардсон-Луси (Richardson-Lucy);
- Регуларизация на Тихонов (Tikhonov Regularization);
- Филтрация на Винер (Wiener Filtering);
- Сляпа деконволюция (Blind Deconvolution).

Качеството на възстановените изображения се оценява количествено чрез две основни метрики:

*MSE* (Mean Squared Error) – оценява средноквадратичната грешка спрямо оригиналното (идеално) изображение;

*SSIM* (Structural Similarity Index) – оценява степента на структурно подобие спрямо оригинала.

По-ниските стойности на *MSE* и стойностите на *SSIM*, по-близки до 1, съответстват на по-високо качество на възстановяване и по-добра ефективност на използвания алгоритъм.

### 3. Алгоритми за възстановяване на изображения

За целите на изследването са използвани четири основни алгоритъма за възстановяване на изображения (деконволюция), реализирани в средата на MATLAB. Тези алгоритми се базират на различни оптимизационни критерии и математически подходи:

#### 3.1 Алгоритъм на Ричардсон-Луси (Richardson-Lucy – RL)

Алгоритъмът на Ричардсон-Луси е един от най-разпространените итеративни методи за възстановяване на астрономически [10] и медицински изображения [11]. В областта на компютърната томография той е известен като метод на максималното очакване (Expectation-Maximization – EM) [12].

Итерационният процес при RL алгоритъма се описва с равенството:

$$f^{(k+1)} = f^{(k)} A^T \left( \frac{g}{A f^{(k)}} \right) \quad (1)$$

Където  $f^{(k)}$  е възстановеното изображение на итерация  $k$ ,  $g$  е размазаното изображение, а  $A$  е размазващата матрица PSF.

Този алгоритъм се отличава с по-голям обем изчисления и сравнително бавна сходимост. Поради тази причина основният проблем при практическото му приложение е свързан с намирането на методи за ускоряване на итерационния процес и намаляване на изчислителната му сложност.

#### 3.2 Алгоритъм с регуларизация на Тихонов (Tikhonov Regularization)

Алгоритъмът с регуларизация на Тихонов е класически метод от теорията на най-малките квадрати, който възстановява изображението, като същевременно налага изискване за гладкост на решението  $\Omega(f) = \|f\|_2^2$ . Той минимизира следния функционал [13]:

$$J(g, f) = \|A f - g\|_2^2 + \mu \|f\|_2^2 \quad (2)$$

Където  $\mu$  е параметър на регуларизация. Решението се пресмята по формулата:

$$f_\mu = (A^T A + \mu I)^{-1} A^T g \quad (3)$$

Основният проблем при този метод е изборът на оптимална стойност за параметъра  $\mu$ . Оптимизирането му може да се извърши чрез критериите за качество *MSE* и *SSIM*. За намаляване на изчислителната сложност алгоритъмът се реализира в честотната област:

$$f_\mu = \mathcal{F}^{-1} \left\{ \frac{H^*}{|H|^2 + \mu} G \right\} \quad (4)$$

Където  $H = FFT(A)$  е спектърът на размазващата матрица,  $G = FFT(g)$  е спектърът на размазаното изображение, а  $H^*$  е комплексно спрегнатото изображение на  $H$ .

#### 3.3. Винерова филтрация (Wiener Filtering)

Филтърът на Винер представлява подобрена версия на инверсия филтър, при която се използва допълнително коригиращо звено за потискане на шума във възстановеното изображение. Възстановяването в честотната област се описва с равенството [14]:

$$f = \mathcal{F}^{-1} \left\{ \frac{H^*}{|H|^2 + K} G \right\} \quad (5)$$

Където константата  $K$  регулира съотношението между нивото на потиснатия шум и запазването на детайлността на изображението. По-високите стойности на  $K$  осигуряват по-силно потискане на шума, но за сметка на известно размиване на детайлите.

#### 3.4. Сляпа деконволюция (Blind Image Deconvolution)

Задачата за сляпа деконволюция се състои във възстановяване на оригиналното изображение  $f$  от наблюдаваното изображение  $g$  при условие, че размазващата матрица  $A$  е неизвестна [8]. Това е некоректно поставена задача (ill-posed problem), тъй като съществува безкраен брой двойки  $(A, f)$ , които могат да генерират едно и също изображение  $g$ .

За решаването ѝ се въвеждат допълнителни ограничения (например неотрицателност на елементите на  $A$  и  $g$ , както и значително по-малък размер на  $A$  спрямо  $g$ ). Основният подход разчита на итеративна оценка, при която последователно се подобряват оценките за изображението  $f^*$  и размазващата матрица  $A^*$ . В настоящата работа като начално приближение за матрицата  $A$  се използват данните, получени от инерциалните сензори.

### 4. Оценка на качеството на алгоритмите за възстановяване на изображения

За количествена оценка на ефективността на изследваните алгоритми са използвани два основни показателя: средноквадратична грешка (*MSE*) и индекс за структурно подобие (*SSIM*).

#### 4.1 Средноквадратична грешка (Mean Squared Error – MSE)

Съгласно [9], параметърът *MSE* измерва отклонението между възстановеното изображение  $J$  и оригиналното (идеално) изображение  $I$ . По-ниските стойности на *MSE* съответстват на по-малка разлика спрямо оригинала и съответно на по-високо качество на възстановяване. Изчислява се по формулата:

$$MSE = \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (I_{i,j} - J_{i,j})^2} \quad (6)$$

Където  $M \times N$  са размерите на изображението в пиксели.



#### 4.2. Индекс за структурно подобие (Structural Similarity Index – SSIM)

Тъй като параметърът  $MSE$  не отчита възприятието на човешкото зрение и структурните връзки между пикселите, Ванг и колектив [15-19] предлагат метриката  $SSIM$  за оценка на подобие между две полутонови изображения. Тя се определя чрез израза:

$$SSIM = \left( \frac{\sigma_{IJ}}{\sigma_I \sigma_J} \right) \left( \frac{2m_I m_J}{m_I^2 + m_J^2} \right) \left( \frac{2\sigma_I \sigma_J}{\sigma_I^2 + \sigma_J^2} \right) \quad (7)$$

Където:

$$m_I = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N I_{i,j}; \quad m_J = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N J_{i,j}$$

$$\sigma_I^2 = \frac{1}{(M-1)(N-1)} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (I_{i,j} - m_I)^2$$

$$\sigma_J^2 = \frac{1}{(M-1)(N-1)} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (J_{i,j} - m_J)^2$$

$$\sigma_{IJ} = \frac{1}{(M-1)(N-1)} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (I_{i,j} - m_I)(J_{i,j} - m_J)$$

При напълно идентични изображения ( $I = J$ ) стойността на  $SSIM$  е равна на 1. Колкото по-близка е стойността до 1, толкова по-високо е качеството на възстановеното изображение.

#### 5 Резултати от статистическото моделиране

Чрез статистическо моделиране по метода Монте Карло са получени оценки за параметрите  $MSE$  и  $SSIM$  за четири типа функции на разсейване на точката PSF и четирите изследвани алгоритъма при нива на шум  $SNR = 5 \text{ dB}$  (Таблица 1) и  $SNR = 15 \text{ dB}$  (Таблица 2).

**Таблица 1:** Параметри  $MSE$  и  $SSIM$  при  $SNR = 5 \text{ dB}$

| Тип PSF  | Алгоритъм за възстановяване на изображение |      |                          |      |                 |      |                    |      |
|----------|--------------------------------------------|------|--------------------------|------|-----------------|------|--------------------|------|
|          | Ричардсон-Луси                             |      | Регуларизация на Тихонов |      | Филтр. на Винер |      | Сляпа деконволюция |      |
|          | MSE                                        | SSIM | MSE                      | SSIM | MSE             | SSIM | MSE                | SSIM |
| Motion   | 3.93                                       | 0.99 | 4.13                     | 0.99 | 4.90            | 0.99 | 4.55               | 0.98 |
| Measured | 8.46                                       | 0.84 | 8.36                     | 0.85 | 8.58            | 0.84 | 8.45               | 0.84 |
| Smoothed | 6.91                                       | 0.92 | 6.73                     | 0.93 | 7.21            | 0.92 | 6.91               | 0.93 |
| Noise    | 7.73                                       | 0.88 | 7.64                     | 0.89 | 7.86            | 0.88 | 7.73               | 0.88 |

**Таблица 2:** Параметри  $MSE$  и  $SSIM$  при  $SNR = 15 \text{ dB}$

| Тип PSF  | Алгоритъм за възстановяване на изображение |      |                          |      |                 |      |                    |      |
|----------|--------------------------------------------|------|--------------------------|------|-----------------|------|--------------------|------|
|          | Ричардсон-Луси                             |      | Регуларизация на Тихонов |      | Филтр. на Винер |      | Сляпа деконволюция |      |
|          | MSE                                        | SSIM | MSE                      | SSIM | MSE             | SSIM | MSE                | SSIM |
| Motion   | 3.93                                       | 0.99 | 4.13                     | 0.99 | 4.90            | 0.99 | 4.55               | 0.98 |
| Measured | 6.19                                       | 0.95 | 5.98                     | 0.95 | 6.63            | 0.95 | 6.18               | 0.95 |
| Smoothed | 5.42                                       | 0.97 | 5.20                     | 0.97 | 6.09            | 0.97 | 5.41               | 0.97 |
| Noise    | 5.41                                       | 0.96 | 5.28                     | 0.96 | 5.59            | 0.96 | 5.41               | 0.96 |

От получените резултати се вижда, че най-добрите стойности на параметрите на  $MSE$  и  $SSIM$  съответствуват на случая "Motion", когато PSF на движението се измерва без грешки и трептене на камерата.

Грешките на възстановяване намаляват, ако измерената PSF се изглажда преди процедурата за възстановяване на изображение. Грешките при възстановяване намаляват значително, когато измерената PSF се изглажда предварително, преди да се приложи процедурата за възстановяване на изображение. Точността се повишава, когато PSF на движението е компенсирана, а алгоритъмът за възстановяване отстранява само грешката, предизвикана от трептенето на камерата. Грешките при възстановяване намаляват с

увеличаването на отношението сигнал/шум (от 5 dB на 15 dB), т.е. при ограничаване на измервателните грешки и смущенията от трептенето на камерата.

#### 5. Заключение

В настоящата работа са изследвани и анализирани четири алгоритъма за възстановяване на изображения (Ричардсон-Луси, регуларизация на Тихонов, филтрация на Винер и сляпа деконволюция), приложени върху изображение, което е размазано вследствие на движение и трептене на камера. За оценяване на размазващата матрица PSF е приложен подход, базиран на данни от инерциални сензори.

На базата на проведените симулации по метода Монте Карло и направените оценки чрез метриките  $MSE$  и  $SSIM$  могат да се направят следните основни изводи:

Най-високо качество на възстановеното изображение (най-ниска стойност на  $MSE$  и най-висока на  $SSIM$ ) се постига при идеално известна PSF („Motion“). Наличието на измервателни грешки и шум от трептене („Measured“) влошава показателите за качество.

Предварителното филтриране и отделяне на тренда на движението от шума в PSF („Smoothed“) води до осезаемо подобрене на резултатите спрямо суровите измерени данни при всички изследвани алгоритми.

Увеличаването на отношението сигнал/шум от 5 dB на 15 dB води до значително намаляване на грешките при деконволюция и доближаване на  $SSIM$  до стойности над 0.95.

Алгоритмите с регуларизация на Тихонов и Ричардсон-Луси показват леко превъзходство по отношение на структурното подобие ( $SSIM$ ) и средноквадратичната грешка ( $MSE$ ) спрямо класическата Винерова филтрация и сляпата деконволюция при наличие на изгладена PSF.

Получените резултати потвърждават практическата приложимост на инерциално базираната оценка на PSF в системи за цифрова обработка на изображения и видеозаснемане в реално време. Бъдещите изследвания могат да бъдат насочени към адаптивно определяне на параметрите на регуларизация спрямо динамично променящо се ниво на шум.

**Благодарности:** Статията е реализирана по проект „Иновативни методи и алгоритми за откриване и разпознаване на подвижни обекти чрез интегриране на хетерогенни данни“, КР-06-Н 72/4/05.12.2023, финансиран от ФНИ-МОН.

#### 6. References

- Garvanova, M., Ivanov, V. (2020). Quality assessment of defocused image recovery algorithms. 3rd International Conference on Sensors, Signal and Image Processing – SSIP 2020, October 9-11, 2020, Prague, Czech Republic. ACM International Conference Proceeding Series, pp. 25-30. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, <https://doi.org/10.1145/3441233.3441242>.
- Garvanova, M., Ivanov, V. (2021). Quality assessment of image deburring algorithms. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, vol. 1031(1), pp. 1-5, doi: 10.1088/1757-899X/1031/1/012051.
- Fergus, R., Singh, B., Hertzmann, A., Roweis, S. T., Freeman, W. T. (2006). Removing camera shake from a single photograph. ACM Transactions on Graphics (TOG), 25(3), pp. 787-794, <https://doi.org/10.1145/1141911.114195>.
- Joshi, N., Kang, S. B., Zitnick, C. L., Szeliski, R. (2010). Image deblurring using inertial measurement sensors. ACM Transactions on Graphics (TOG), 29(4), pp. 1-9, <https://doi.org/10.1145/1778765.1778767>.

5. Šindelář, O., Šroubek, F. (2013). Image deblurring in smartphone devices using built-in inertial measurement sensors. *Journal of Electronic Imaging*, 22(1), <https://doi.org/10.1117/1.JEI.22.1.011003>.
6. Hu, Z., Yuan, L., Lin, S., Yang, M. H. (2016). Image deblurring using smartphone inertial sensors. In *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, Las Vegas, NV, USA, 2016, pp. 1855-1864, doi: 10.1109/CVPR.2016.205.
7. Wang, Z., Bovik, A. C., Sheikh, H. R., Simoncelli, E. P. (2004). Image quality assessment: from error visibility to structural similarity. *IEEE Transactions on Image Processing*, 13(4), pp. 600-612, April 2004, doi: 10.1109/TIP.2003.819861.
8. Poulouse, M. (2013). Literature survey on image deblurring techniques. *International Journal of Computer Applications Technology and Research*, vol. 2(3), pp. 286-288.
9. Avciabas I., Sankur B., Sayood K. (2002). Statistical evaluating of image quality measures. *Journal of Electronic Imaging*, vol. 11, No 2, April 2002, pp. 206-223.
10. Prato, M., Cavicchioli, R., Zanni, L., Boccacci, P., Bertero, M. (2012). Efficient deconvolution methods for astronomical imaging: Algorithms and IDL-GPU codes. *Journal Astronomy & Astrophysics* 539, A133, p. 11, doi: 10.1051/0004-6361/201118681.
11. Shepp, L., Vardi, Y. (1982). Maximum likelihood reconstruction for emission tomography. In *IEEE Transactions on Medical Imaging*, vol. 1, № 2, pp. 113-122, doi: 10.1109/TMI.1982.4307558.
12. Richardson, W. (1972). Bayesian-based iterative method of image restoration. *Journal Optical Society of America*, vol. 62, pp. 55-59.
13. Michael, K. Ng, Raymond, H. Chan, Wun-Cheung Tang. (1999). A fast algorithm for deblurring models with Neumann boundary conditions. *SIAM Journal on Scientific Computing*, vol. 21 (3), pp. 851-866, <https://doi.org/10.1137/S1064827598341384>.
14. Bertero, M., Boccacci, P. (2005). Image deconvolution. In: Evangelista, V., Barsanti, L., Passarelli, V., and Gualtieri, P. (Eds.), *From cells to proteins: Imaging nature across dimensions*. NATO security through science series (Series B: Physics and Biophysics). Springer, Dordrecht, [https://doi.org/10.1007/1-4020-3616-7\\_17](https://doi.org/10.1007/1-4020-3616-7_17).
15. Wang Z., Bovic A, Sneikh H. (2004). Image quality assessment: From error visibility to structural similarity. *IEEE Trans. on Image Processing*, vol.13(4), pp. 309-312.
16. Kabakchiev C., V. Behar, I. Garvanov, D. Kabakchieva, L. Daniel, K. Kabakchiev, M. Gashinova, M. Cherniakov. (2015). Experimental verification of maritime target parameter evaluation in forward scatter maritime radar. *IET Radar, Sonar & Navigation*, vol. 9(4), 1 April 2015, pp. 355-363, doi: 10.1049/iet-rsn.2014.0010.
17. Garvanova, M., I. Garvanov, D. Borissova, (2020). The Influence of Electromagnetic Fields on Human Brain. 2020 21st International Symposium on Electrical Apparatus & Technologies (SIELA), Bourgas, Bulgaria, 2020, pp. 1-4, doi: 10.1109/SIELA49118.2020.9167099.
18. Kabakchiev, C., I. Garvanov, V. Behar, H. Rohling, A. Lazarov. (2013). The Experimental Study of Target FSR Shadows Detection using GPS signals. *Proc. of the Third International Symposium on Radio Systems and Space Plasma*, Sofia, Bulgaria, pp. 64-73.
19. Kabakchiev, C., I. Garvanov, V. Behar, D. Kabakchieva, K. Kabakchiev, H. Rohling, K. Kulpa, A. Yarovoy. (2015). Detection and Classification of Objects from Their Radio Shadows of GPS Signals. *Proc. of the International Radar Symposium IRS-2015*, Dresden, Germany, pp. 906-911, doi: 10.1109/IRS.2015.7226336.

# Stakeholders' Attitudes toward the Assessment of the Quality and Effectiveness of Inclusive Education: Results of a Survey Study

Ivanka Yankova<sup>1</sup>, Silviya Stancheva<sup>2</sup>, Kamelia Nusheva<sup>3</sup>

Prof. DSc, University of Library Studies and Information Technologies (ULSIT)<sup>1</sup>

Assoc. Prof. Dr. University of Library Studies and Information Technologies (ULSIT)<sup>2</sup>

Chef. Asist. Dr., University of Library Studies and Information Technologies (ULSIT)<sup>3</sup>

i.yankova@unibit.bg<sup>1</sup>, s.stancheva@unibit.bg<sup>2</sup>, k.nusheva@unibit.bg<sup>3</sup>

**Abstract:** *This study was conducted within the framework of the project “A Model for Assessing the Effectiveness and Quality of Inclusive Education, Training, and Lifelong Learning” (Grant No. KP-06-N80/1, 7 December 2023). It presents an analysis of the results of a survey conducted among representatives of key stakeholders in the education system. The primary objective of the study is to identify participants' attitudes and perceptions regarding the key factors that determine the quality and effectiveness of inclusive education, as well as to identify the most significant criteria and indicators to be incorporated into the assessment model currently under development. The findings provide an empirical basis for refining the model and contribute to the development of an effective system for monitoring and evaluating inclusive educational practices in Bulgaria.*

**Keywords:** QUALITY; EFFECTIVENESS; INCLUSIVE EDUCATION; SURVEY RESEARCH; LIFELONG LEARNING

## 1. Introduction

Inclusive education is one of the key priorities of contemporary educational policy, as it ensures the right of every learner to equal access to quality education regardless of individual characteristics, educational needs, social status, ethnicity, or health condition. It is founded on the principles of equality, non-discrimination, respect for diversity, and the creation of a supportive educational environment that fosters the full participation and development of all participants in the educational process. Within the context of lifelong learning, inclusive education assumes even greater significance, as it promotes the development of competencies essential for personal growth, social inclusion, and active citizenship throughout all stages of life [1].

The implementation of inclusive education policies places new demands on the mechanisms used to monitor and evaluate their effectiveness. Beyond ensuring access to education, increasing attention is being given to assessing the extent to which education systems provide conditions for active participation, academic achievement, social inclusion, and the satisfaction of all stakeholders. This highlights the need for a reliable and scientifically validated model for assessing the quality and effectiveness of inclusive education that takes into account both the quantitative and qualitative dimensions of the educational process. Such a model should provide objective evidence on strengths, challenges, and areas requiring improvement, thereby supporting informed decision-making and contributing to the continuous enhancement of educational policies and practices.

## 2. Theoretical Background

In the scientific literature, the assessment of the effectiveness of inclusive education is regarded as a multidimensional process that encompasses pedagogical, organisational, social, and technological factors. The European Agency for Special Needs and Inclusive Education (2022) emphasises that successful inclusion depends on several interrelated prerequisites: well-prepared pedagogical specialists, effective leadership, institutional support, the availability of resources, and the systematic monitoring of outcomes. [2] Similar conclusions are presented in the publications of the Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD), which consider the quality of education to be the result of the interaction between human capital, management practices, and the capacity of institutions to implement innovative solutions.

An essential place in the conceptual framework is occupied by the development of social and emotional competencies. OECD research (Skills for Social Progress, 2015) shows that these competencies have a direct impact on academic achievement, learning motivation, social adaptation, and the successful inclusion of learners in the educational environment. Therefore, social and emotional learning is increasingly regarded as an integral component of inclusive education rather than as a complementary pedagogical practice. [5,8]

Another key element is lifelong learning, which the European Commission defines as a fundamental mechanism for the continuous development of competencies and adaptation to dynamic social and technological changes (European Commission, 2020). Within the context of inclusive education, this concept acquires additional significance, as it presupposes the continuous professional development of pedagogical specialists, the improvement of teaching methods, and the development of learners' individual potential. At the same time, digitalisation and the use of adaptive technologies have become important factors supporting personalised learning and expanding opportunities for the participation of learners with special educational needs. [4]

Based on these theoretical premises, the present study assumes that the quality and effectiveness of inclusive education are shaped by several interrelated dimensions: the professional training of teachers, social and emotional competencies, institutional and resource support, the integration of lifelong learning, and the use of modern technologies. These dimensions form the conceptual basis of the survey questionnaire, which was designed to identify the factors with the most significant influence on the quality and effectiveness of inclusive education.

## 3. Prerequisites and Approaches to Addressing the Problem

Assessing the quality and effectiveness of inclusive education is a complex process that extends beyond measuring academic achievement and encompasses multiple interrelated dimensions of the educational environment. Contemporary research and international policy frameworks define the quality of inclusive education as the capacity of education systems to ensure equitable access, meaningful participation, and equal opportunities for learning and development for all learners, regardless of their individual characteristics and educational needs. The key dimensions of quality include the accessibility of the learning environment, equal participation in the educational process, individualized support, the professional competence of educational staff, effective collaboration among educational

institutions, families, and local communities, as well as the establishment of an organizational culture that promotes respect for diversity and social inclusion [7]. An equally important dimension is the provision of opportunities for developing the key competencies required for successful lifelong learning.

The effectiveness of inclusive education is assessed by the extent to which the education system achieves its intended objectives. This includes not only improvements in learning outcomes but also the reduction of early school leaving, increased social participation of learners, the development of a positive school climate, and the satisfaction of all stakeholder groups. Consequently, the assessment of effectiveness should be based on a comprehensive system of quantitative and qualitative indicators capable of capturing the various dimensions of the inclusive educational process [6].

Current research increasingly advocates a multidimensional approach to the development of assessment models, integrating structural indicators (e.g., resources, regulatory frameworks, and human capacity), process indicators (e.g., organization of teaching and learning, instructional methods, and supportive educational environments), and outcome indicators (e.g., learning achievements, social inclusion, stakeholder satisfaction, and the sustainability of educational outcomes). Such an approach enables a more comprehensive and objective evaluation of the quality of inclusive education while providing a solid foundation for the continuous improvement of educational policies and practices.

#### 4. Research Methodology

Survey research is one of the most widely used methods for collecting empirical data in studies examining the quality and effectiveness of education systems. It provides a systematic means of gathering information on the opinions, attitudes, levels of satisfaction, and professional experience of various stakeholder groups, including teachers, school leaders, specialists in learner support, parents, students, and representatives of relevant institutions. One of the principal advantages of survey research is its ability to reach a large number of respondents and generate standardized data suitable for statistical analysis and comparison across different stakeholder groups. The findings facilitate the identification of the key factors influencing the quality of inclusive education and help determine the relative importance of the criteria and indicators incorporated into the assessment model.

Within the process of developing an assessment model, survey research serves several essential purposes. First, it provides an empirical foundation for the formulation and validation of assessment criteria. Second, it enables the identification of differences in the perceptions and evaluations of various stakeholder groups, thereby contributing to the development of a more balanced, comprehensive, and practically applicable assessment model. Third, survey findings support the verification of the reliability and practical applicability of the proposed indicators through appropriate statistical analyses.

The present study adopts this approach by analysing data collected through a survey conducted within the framework of the project aimed at developing a model for assessing the effectiveness and quality of inclusive education, training, and lifelong learning. The analysis of the survey findings seeks to identify significant factors and the relationships among them, thereby providing an empirical basis for the development, validation, and further refinement of the proposed assessment model.

#### 5. Results and Discussion

The analysis of the respondents' demographic profile reveals several important characteristics that should be considered when interpreting the findings. The survey participants were predominantly women (80.8%), reflecting the gender structure of the teaching profession in Bulgaria, where women constitute the majority of educational staff. The age distribution indicates a concentration in the middle and older age groups, with the largest proportion of respondents aged 45-54 years (35.1%), followed by those aged 55-64 years (25.7%). These findings suggest that the survey primarily captured the views of experienced professionals with substantial practical and institutional expertise. The respondents also demonstrated a high educational profile. More than two-fifths (41.1%) held a doctoral degree, while 38.4% possessed a master's degree. This educational background enhances the credibility of the findings, as the responses reflect the informed judgments of highly qualified professionals capable of critically evaluating issues related to inclusive education. Furthermore, over half of the respondents (61.6%) reported direct professional experience working with learners with special educational needs (SEN). This represents a particularly valuable characteristic of the sample, as the respondents' opinions are grounded not only in theoretical knowledge but also in practical experience, providing a solid empirical basis for assessing the challenges and opportunities associated with inclusive education.

The survey findings indicate a predominantly positive perception of the effectiveness of inclusive education. Nearly half of the respondents (45.2%) considered inclusive education to be fully effective, while a further 42.5% evaluated it as partially effective. Consequently, almost 88% of participants expressed a positive opinion to varying degrees, demonstrating substantial confidence in the principles and implementation of inclusive education. Only 11% of respondents questioned its effectiveness, representing a relatively small but important group of critical perspectives. Nevertheless, qualitative comments provided by participants reveal a more nuanced understanding of the issue. Many respondents emphasized that the effectiveness of inclusive education depends largely on contextual factors, particularly the professional competence and preparedness of teachers, the availability of educational resources, and the existence of a supportive learning environment. These observations underline the complexity of implementing inclusive education successfully and highlight the importance of comprehensive institutional support, continuous professional development, and effective educational policies.

The results also demonstrate an almost unanimous recognition of the importance of social and emotional competencies within inclusive education. An overwhelming majority of respondents (93.3%) identified these competencies as either essential or important for the successful inclusion of learners with special educational needs. Notably, no respondents considered social and emotional competencies to be unimportant, indicating a high level of professional awareness among educational specialists and representatives of cultural institutions. However, 6.7% of respondents expressed concerns that socio-emotional competencies do not receive sufficient attention within current educational practice. This critical observation points to the need for targeted interventions and educational programmes designed to systematically develop learners' emotional intelligence and social skills. In this regard, socio-emotional competencies should be viewed not merely as a complementary component of education but as a fundamental element of an effective inclusive educational environment.

Overall, the findings reveal a combination of extensive professional experience, a predominantly positive attitude towards inclusive education, and a well-developed awareness of the factors influencing its effectiveness. At the same time, respondents



identified a clear gap between the recognized importance of socio-emotional competencies and their practical implementation in educational settings. These findings suggest that strengthening programmes aimed at developing emotional intelligence and social competencies should be regarded as a strategic priority for enhancing the quality and effectiveness of inclusive education in Bulgaria.

The findings identify insufficient professional training of teachers as the most significant challenge facing inclusive education, reported by 53.4% of respondents. This deficiency raises concerns about the effectiveness of current pedagogical practices and limits the sustainable development of inclusive educational processes. The second most frequently identified challenge is the lack of adequate resources (47.9%), which directly affects the quality of the learning environment and access to contemporary teaching methodologies and technological tools. Weak administrative support (27.4%) was also recognised as a substantial barrier, limiting coordination among institutional stakeholders and reducing the effectiveness of educational management.

The qualitative analysis of respondents' comments provides additional insight into the systemic challenges associated with implementing inclusive education. Participants frequently referred to insufficient knowledge and awareness regarding the educational needs of learners with special educational needs (SEN), as well as concerns that providing additional support for these learners may slow the progress of the rest of the class. Respondents also highlighted the absence of clearly structured pedagogical strategies for classroom management and for ensuring the effective inclusion of all learners within a shared educational environment. These findings emphasize the need for a comprehensive approach focused on strengthening teachers' professional competencies, improving the availability of educational resources, and enhancing institutional support. Only through the coordinated implementation of these measures can the quality of inclusive education and the successful integration of learners with SEN be sustainably improved.

The role of technology in supporting inclusive education was evaluated very positively by the respondents. A substantial majority (83.5%) acknowledged the positive impact of digital technologies on the educational process, demonstrating strong support for further investment in digital and adaptive learning solutions. Such technologies provide opportunities to personalize instruction, increase learner engagement, and facilitate the implementation of inclusive pedagogical practices. Although respondents expressed more diverse opinions regarding the motivational impact of these technologies, the overall findings clearly indicate that digitalisation represents one of the key drivers for improving the effectiveness of inclusive education.

The survey also identified the main priorities for the future development of inclusive education. The strongest support was expressed for expanding practical training opportunities for teachers (72.6%), reflecting the need to complement theoretical preparation with practice-oriented knowledge and professional skills. This finding confirms that the quality of inclusive education depends largely on teachers' ability to apply evidence-based methods and effective classroom strategies in real educational settings.

The development of specialised educational materials ranked second among the proposed priorities (57.5%), indicating the need for accessible, scientifically validated, and practice-oriented resources to support teachers in their daily work. Establishing such a resource base would contribute to greater consistency in educational practice and improve the overall quality of inclusive education. Comparable levels of support were expressed for increasing financial support (56.2%) and expanding the use of adaptive educational technologies (56.2%). The demand for

additional funding reflects the recognition that limited financial resources remain one of the major barriers to implementing innovative educational practices. At the same time, respondents emphasized the importance of adaptive technologies for creating personalised learning environments and reducing barriers to participation. These findings underline the importance of sustained investment in educational innovation, digital transformation, and resource development as key prerequisites for strengthening the quality and effectiveness of inclusive education [3].

## Conclusion

The findings of this study provide valuable empirical evidence for the development of a comprehensive model for assessing the quality and effectiveness of inclusive education, training, and lifelong learning. Overall, respondents expressed a predominantly positive attitude towards inclusive education while simultaneously identifying several critical challenges that require targeted policy interventions. The most significant concerns relate to the insufficient professional preparation of teachers, limited educational resources, and inadequate institutional support. At the same time, respondents highlighted the importance of social and emotional competencies, practical teacher training, and the integration of digital and adaptive technologies as essential factors for improving inclusive educational practices.

The results emphasize that the effectiveness of inclusive education depends on a balanced combination of well-qualified educational professionals, adequate financial and institutional support, accessible educational resources, and continuous technological innovation. These components should not be considered independently but rather as complementary elements of an integrated educational system capable of responding to the diverse needs of all learners.

The proposed assessment model is intended to provide a reliable framework for monitoring and evaluating the quality and effectiveness of inclusive education by integrating evidence-based indicators that reflect both quantitative and qualitative dimensions of the educational process. The findings of this study contribute to the refinement of the model and provide practical guidance for policymakers, educational institutions, and other stakeholders committed to strengthening inclusive education in Bulgaria. Ultimately, the continuous improvement of inclusive educational policies and practices will contribute not only to higher educational quality but also to greater social inclusion, equity, and lifelong learning opportunities for all.

## Acknowledgements:

This paper was prepared within the framework of the research project "A Model for Assessing the Effectiveness and Quality of Inclusive Education, Training, and Lifelong Learning" (Grant No. KP-06-N80/1), funded by the National Science Fund of the Republic of Bulgaria.

## References

1. Ainscow, M. (2020). *Promoting inclusion and equity in education: Lessons from international experiences*. Nordic Journal of Studies in Educational Policy, 6(1), 7–16. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/339692750\\_Promoting\\_inclusion\\_and\\_equity\\_in\\_education\\_lessons\\_from\\_international\\_experiences](https://www.researchgate.net/publication/339692750_Promoting_inclusion_and_equity_in_education_lessons_from_international_experiences)
2. European Agency for Special Needs and Inclusive Education (2022). *Profile for Inclusive Teacher Professional Learning: Including all education professionals in teacher professional*

- learning for inclusion. Available at: <https://www.european-agency.org/resources/publications/TPL4I-profile>
3. European Agency for Special Needs and Inclusive Education. (2011). *Outline Indicators for Inclusive Assessment*. Odense, Denmark. Available at: [https://www.european-agency.org/sites/default/files/assessment-materials-indicators\\_assessment\\_indicators\\_en.pdf](https://www.european-agency.org/sites/default/files/assessment-materials-indicators_assessment_indicators_en.pdf)
  4. **European Commission (2020)**. *European Skills Agenda for Sustainable Competitiveness, Social Fairness and Resilience*. Available at: [https://pact-for-skills.ec.europa.eu/community-resources/publications-and-documents/european-skills-agenda-sustainable-competitiveness-social-fairness-and-resilience\\_en](https://pact-for-skills.ec.europa.eu/community-resources/publications-and-documents/european-skills-agenda-sustainable-competitiveness-social-fairness-and-resilience_en)
  5. **OECD (2015)**. *Skills for Social Progress: The Power of Social and Emotional Skills*. [https://www.oecd.org/en/publications/skills-for-social-progress\\_9789264226159-en.html](https://www.oecd.org/en/publications/skills-for-social-progress_9789264226159-en.html)
  6. OECD. (2023). *Equity and Inclusion in Education: Finding Strength through Diversity*. Paris: OECD Publishing. Available at: [https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2023/01/equity-and-inclusion-in-education\\_e8cfc768/e9072e21-en.pdf](https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2023/01/equity-and-inclusion-in-education_e8cfc768/e9072e21-en.pdf)
  7. OECD. (2023). Mezzanotte, C., & Calvel, C. *Indicators of Inclusion in Education: A Framework for Analysis*. OECD Education Working Papers No. 300. Paris: OECD Publishing. Available at: [https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2023/10/indicators-of-inclusion-in-education\\_11108200/d94f3bd8-en.pdf](https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2023/10/indicators-of-inclusion-in-education_11108200/d94f3bd8-en.pdf)
  8. Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). (2023). *Education at a Glance 2023: OECD Indicators*. Paris: OECD Publishing. Available at: <https://doi.org/10.1787/e13bef63-en>

## Дигиталните технологии като средство за взаимодействие между библиотечното образование и библиотечните ресурси

Паола Любенова, Иван Хаджиев 2,

Докторант, Университет по библиотекознание и информационни технологии (УниБИТ)1

Докторант, Университет по библиотекознание и информационни технологии (УниБИТ)2

[p.galovich@unibit.bg](mailto:p.galovich@unibit.bg)

[i.hadzhiev158@gmail.com](mailto:i.hadzhiev158@gmail.com)

**Резюме:** Развитието на дигиталните технологии оказва съществено влияние върху съвременното библиотечно образование, като променя начина, по който се осъществява достъпът до информация, организира се обучението и се използват библиотечните ресурси. Настоящият доклад разглежда ролята на дигиталните технологии като средство за ефективно взаимодействие между библиотечното образование и библиотечните ресурси в условията на цифрова трансформация. Анализирани са възможностите, които предоставят системите за електронно обучение, дигиталните библиотеки, институционалните репозитории, електронните каталози и облачните технологии за подобряване на образователния процес и за развитие на професионалните компетентности на бъдещите библиотечно-информационни специалисти. Специално внимание е отделено на интегрирането на интелигентни технологии, включително инструменти, базирани на изкуствен интелект, като средство за подпомагане на обучението, научноизследователската дейност и информационното обслужване. В резултат на изследването е предложен концептуален модел на взаимодействие между библиотечното образование и библиотечните ресурси чрез дигитални технологии, който може да бъде използван при разработването на съвременни образователни практики и учебни програми във висшето образование.

**Ключови думи:** дигитални технологии; библиотечно образование; библиотечни ресурси; дигитални библиотеки; електронно обучение; дигитални компетентности; информационно общество.

### 1. Въведение

Развитието на дигиталните технологии през последните десетилетия оказва съществено влияние върху библиотечното образование и библиотечно-информационната практика. Дигитализацията на информационните ресурси, разширяването на електронните услуги и внедряването на съвременни информационни и комуникационни технологии променят традиционните модели на обучение и поставят нови изисквания към подготовката на библиотечно-информационните специалисти. В тази среда библиотеките се утвърждават не само като институции за съхраняване и предоставяне на информация, но и като активни участници в образователния процес, подпомагащи развитието на дигитални компетентности, информационна грамотност и учене през целия живот. Съвременните дигитални библиотеки, институционални репозитории, електронни каталози и платформи за електронно обучение създават нови възможности за интегриране на библиотечните ресурси в образователния процес. Тази трансформация променя начина, по който студентите и преподавателите осъществяват достъп до научна информация, организират обучението и развиват професионални компетентности, необходими за работа в условията на цифровото общество. Целта на настоящия доклад е да анализира ролята на дигиталните технологии като средство за взаимодействие между библиотечното образование и библиотечните ресурси. Акцентът е поставен върху възможностите, които съвременните дигитални решения предоставят за повишаване качеството на обучението, за по-ефективно използване на библиотечните ресурси и за подготовката на библиотечно-информационни специалисти, отговарящи на съвременните изисквания на професионалната практика.

### 2. Теоретични аспекти на взаимодействието между библиотечното образование и библиотечните ресурси

Дигиталната трансформация променя концептуално ролята на библиотеките и библиотечното образование. Ако в традиционния модел библиотеката се възприема преди всичко като институция за съхраняване, организиране и предоставяне на информационни ресурси, то в условията на дигиталната среда тя все по-осезаемо се утвърждава като образователно, информационно и комуникационно пространство. Тази промяна поставя нови изисквания и към подготовката на библиотечно-информационните специалисти, като наред с традиционните професионални знания нараства значението на дигиталните компетентности, информационната грамотност и уменията за критична оценка и управление на информацията. В български контекст развитието на академичното образование по библиотечен и информационен мениджмънт показва стремеж към адаптиране на подготовката на специалистите към технологичните и професионалните промени. Крaстeva, Тренчева, Ефтимова и Тодорова разглеждат съвременните аспекти на обучението по библиотечен и информационен мениджмънт в УниБИТ и подчертават връзката между академичната подготовка и динамично развиващата се професионална среда [1].

Особено значение за разглежданата проблематика има интегрирането на дигиталните ресурси непосредствено в учебния процес. Янкова и Тодорова представят опита от създаването и използването на дигиталния ресурс „Български възрожденски градове“, като показват приложението му при обучението на студенти от библиотечно-

информационни специалности [2]. Този подход позволява библиотечният ресурс да бъде разглеждан не само като информационен източник, но и като инструмент за обучение, практически дейности и развитие на професионални компетентности.

Теоретичната рамка на взаимодействието между библиотечното образование и библиотечните ресурси се допълва от европейските политики за дигитално образование. Планът за действие в областта на цифровото образование 2021–2027 поставя сред основните приоритети развитието на високоефективна дигитална образователна екосистема и подобряването на дигиталните умения и компетентности [3]. Тези приоритети имат пряко значение за библиотечното образование, тъй като професионалната реализация на съвременния библиотечно-информационен специалист е все по-тясно свързана с управлението на електронни ресурси, цифрови колекции и информационни системи.

Следователно дигиталните технологии могат да бъдат определени като свързващ компонент между образователната и библиотечно-информационната среда. Чрез тях библиотечните ресурси се интегрират в процеса на обучение, а придобиването на професионални знания се обвързва с практическото използване на съвременни информационни системи и ресурси.

Международната федерация на библиотечните асоциации и институции (IFLA) разглежда библиотеките като стратегически партньори в развитието на обществото на знанието. Според организацията успешното развитие на библиотечните услуги е пряко свързано с прилагането на съвременни дигитални технологии, развитието на цифровите колекции и осигуряването на равнопоставен достъп до информация. Аналогична позиция заема и ЮНЕСКО, която определя библиотеките като ключов фактор за развитие на цифровото включване, ученето през целия живот и устойчивото развитие.

Анализът на научната литература показва, че дигиталните технологии постепенно трансформират библиотечното образование чрез интегриране на цифрови информационни ресурси, електронни образователни платформи и интелигентни технологии. В резултат на това се формира нов модел на взаимодействие между библиотечното образование и библиотечните ресурси, при който библиотеките се утвърждават като активна част от образователната и научноизследователската среда.

### **3. Предпоставки и подходи за интегриране на дигиталните технологии в библиотечното образование**

Основна предпоставка за засилване на взаимодействието между библиотечното образование и библиотечните ресурси е промяната в самата информационна среда. Значителна част от научната, образователната и културната информация вече се създава, съхранява и разпространява в дигитална форма. Дигиталните библиотеки, институционалните

репозиториуми, електронните каталози и научните бази данни осигуряват достъп до информационни ресурси независимо от пространствени и времеви ограничения.

Дигиталните библиотеки имат особено значение, тъй като обединяват технологичните възможности за съхраняване и предоставяне на информация с образователния потенциал на библиотечните колекции. Практическото интегриране на дигитални ресурси в академичното образование позволява на студентите не само да използват готова информация, но и да усвояват принципите на нейното структуриране, описание, търсене, оценяване и представяне. Опитът, представен от Янкова и Тодорова, показва възможностите дигиталните ресурси да бъдат включени непосредствено в обучението на студенти и да свързват теоретичната подготовка с практическата работа [2].

Особено значение за взаимодействието между библиотечните ресурси и образователния процес имат специализираните виртуални библиотеки. Василева и Станчева разглеждат информационните и образователните възможности на виртуалната „Е-библиотека по библиотечно-информационни и комуникационни науки и културно наследство“ за дистанционно обучение във ФБКН на УниБИТ като пример за интегриране на дигитални библиотечни ресурси в академичната образователна среда [8]

Важен подход е и използването на институционалните репозиториуми и принципите на отворения достъп. Те разширяват възможностите за използване на научни публикации, дисертации, учебни материали и резултати от изследователска дейност. За студентите това означава по-пряк достъп до научното знание, а за библиотечното образование – възможност за практическо изграждане на умения за информационно търсене, подбор на надеждни източници, академично цитиране и отговорно използване на информация.

Системите за електронно обучение представляват друг механизъм за свързване на библиотечните ресурси с образователното съдържание. Включването на електронни книги, статии, дигитални колекции и библиографски ресурси в електронната учебна среда позволява библиотеката да присъства непосредствено в процеса на преподаване и самостоятелна подготовка. По този начин взаимодействието между преподавател, студент и библиотека придобива постоянен характер.

Нова предпоставка за трансформацията на това взаимодействие е развитието на изкуствения интелект и по-специално на генеративните технологии. Те създават възможности за подпомагане на информационното търсене, обобщаването и структурирането на информация, обучението и научноизследователската дейност. Наред с потенциала им обаче възникват проблеми, свързани с достоверността на генерираната информация, защитата на личните данни, интелектуалната собственост и академичната почтеност. UNESCO поставя именно човекоцентричния, етичен и критичен подход в основата на използването на генеративен



изкуствен интелект в образованието и научните изследвания [4]. Поради това ефективният подход към проблема не предполага механично въвеждане на нови технологии, а тяхното педагогически обосновано интегриране. Необходимо е сътрудничество между преподаватели и библиотечни специалисти, актуализиране на учебното съдържание и системно развитие на дигиталната и информационната грамотност на обучаемите.

#### 4. Методология на изследването

Изследването е с теоретико-аналитичен характер и е насочено към установяване на ролята на дигиталните технологии за взаимодействието между библиотечното образование и библиотечните ресурси. Приложени са анализ и синтез на научна литература, документи и сравнителен анализ, както и системен и интерпретативен подход.

Анализирани са научни публикации на български и чуждестранни автори, свързани с библиотечното образование, дигиталните ресурси и информационната грамотност, както и стратегически документи в областта на дигиталното образование и приложението на новите технологии. Подбраните източници са интерпретирани с оглед на възможностите за интегриране на библиотечните ресурси в образователния процес.

Системният подход позволява библиотечното образование, библиотечните ресурси и дигиталните технологии да бъдат разглеждани не като самостоятелни компоненти, а като взаимосвързани елементи на единна информационно-образователна среда. На тази основа са систематизирани основните тенденции, възможности и ограничения на взаимодействието между тях.

#### 5. Резултати и дискусия

Проведеният анализ показва, че дигиталната трансформация не променя единствено технологичната инфраструктура на библиотеките, а оказва пряко влияние върху философията и съдържанието на библиотечното образование. От подготовка, насочена преимуществено към овладяване на традиционните библиотечни процеси, акцентът постепенно се разширява към формиране на компетентности за работа с дигитални ресурси, информационни системи, електронни услуги и нови технологични инструменти.

Първият съществен резултат е свързан с промяната на ролята на библиотечния ресурс в образователния процес. В дигиталната среда той престава да бъде само допълнителен източник на информация и може да функционира като непосредствен инструмент за обучение. Използването на дигитални колекции в академичната подготовка позволява студентите да прилагат на практика знанията за организация, описание, търсене и представяне на информация.

Българският опит с дигитални ресурси в обучението на студенти по библиотечно-информационни специалности потвърждава възможността за подобна връзка между теория, ресурс и практическа дейност [2]. Вторият резултат се отнася до промяната на позицията на библиотеката в академичната среда. Дигиталните технологии позволяват тя да бъде интегрирана по-тясно в преподаването и научноизследователската дейност. Достъпът до електронни каталози, репозиториуми, дигитални библиотеки и научни бази данни превръща библиотеката в постоянен партньор на студентите и преподавателите. Това предполага и разширяване на професионалните функции на библиотечния специалист, който все по-често участва в обучение по информационна грамотност, подпомагане на научното търсене, управление на дигитално съдържание и консултиране относно използването на информационни източници.

Третият резултат е свързан с необходимостта от разширяване на компетентностния профил на бъдещите специалисти. Дигиталната компетентност не може да се свежда единствено до техническо владение на определени платформи и системи. Тя предполага способност за целенасочено информационно търсене, критична оценка на източниците, управление на дигитално съдържание, познаване на авторскоправните ограничения и отговорно използване на информацията. Европейските политики също поставят развитието на дигиталните умения сред основните условия за адаптиране на образованието към дигиталната епоха [3].

В този контекст генеративният изкуствен интелект очертава ново направление в библиотечното образование. Той може да подпомага обучението и информационната дейност, но същевременно увеличава значението на критичната информационна грамотност. Способността да се разпознава недостоверна, непълна или генерирана без проверими източници информация се превръща в съществен компонент на професионалната подготовка. Насоките на UNESCO подчертават необходимостта от човекоцентрично използване на генеративния изкуствен интелект, при което технологиите подпомагат, но не заменят критичната преценка, педагогическата отговорност и човешката експертиза [4].

Резултатите позволяват да се очертае взаимодействие, при което дигиталните технологии изпълняват посредническа функция между три основни компонента: образователно съдържание, библиотечни ресурси и професионални компетентности. Ефективността на тази връзка зависи не толкова от количеството използвани технологични средства, колкото от начина, по който те са интегрирани в учебните програми и практически ориентираната подготовка.

В този смисъл развитието на библиотечното образование предполага устойчиво партньорство между университетите и библиотеките. Библиотечната практика предоставя реалната

информационна среда, в която студентите могат да прилагат знанията си, докато академичното образование осигурява теоретичната и методологичната основа за критично осмисляне и развитие на тази практика. Дигиталните технологии свързват двата компонента и създават условия взаимодействието между тях да бъде непрекъснато, гъвкаво и ориентирано към променящите се професионални потребности.

## 6. Заключение

Дигиталната трансформация променя съществено взаимодействието между библиотечното образование и библиотечните ресурси, като създава нови възможности за повишаване качеството на обучението и за развитие на професионалните компетентности на бъдещите библиотечно-информационни специалисти. Анализът на научната литература показва, че интегрирането на дигитални библиотеки, институционални репозитории, електронни образователни платформи и научни бази данни допринася за по-ефективен достъп до информация и за формиране на устойчива информационна култура. Проведеният анализ позволява да се формулират няколко основни извода. На първо място, дигиталните технологии трансформират библиотечното образование, като създават условия за непосредствено интегриране на библиотечните ресурси в учебния и научноизследователския процес. На второ място, библиотеката постепенно се утвърждава като активен образователен партньор, а не единствено като доставчик на информационни ресурси. На трето място, развитието на дигиталната среда и генеративния изкуствен интелект поставя необходимост от

непрекъснато актуализиране на професионалните компетентности на бъдещите библиотечно-информационни специалисти.

Перспективите за развитие са свързани с по-тясно интегриране на дигиталните библиотеки, електронните ресурси, институционалните репозитории и интелигентните технологии в академичната подготовка. Успешното реализиране на този процес изисква съчетаване на технологичните възможности с критично мислене, информационна грамотност и отговорно отношение към използването на информацията.

Научният принос на изследването се изразява в систематизирането на основните подходи за интегриране на дигиталните технологии в библиотечното образование и в извеждането на тяхната посредническа роля при изграждането на устойчиво взаимодействие между образователната среда и библиотечните ресурси.

## Благодарности:

Настоящата публикация е разработена в рамките на научноизследователския проект „Модел за оценка на ефективността и качеството на приобщаващото образование, обучение и учене през целия живот“ (Договор № КП-06-Н80/1), финансиран от Фонд „Научни изследвания“ към Министерството на образованието и науката на Република България.

Information Management” in ULSIT Using the Digital Collection “Bulgarian Revival”. *Digital Presentation and Preservation of Cultural and Scientific Heritage*, 2, 112–122. DOI: 10.55630/dipp.2012.2.3.

[6] Vuorikari, R., Kluzer, S., & Punie, Y. (2022). *DigComp 2.2: The Digital Competence Framework for Citizens – With New Examples of Knowledge, Skills and Attitudes*. Luxembourg: Publications Office of the European Union. DOI: 10.2760/115376.

[7] International Federation of Library Associations and Institutions (IFLA). (2012). *IFLA/UNESCO Manifesto for Digital Libraries*. The Hague: IFLA.

[8] Vasileva, R., & Stancheva, S. (2014). Информационни и образователни възможности: виртуалната „Е-библиотека за библиотечно-информационни науки, печатни комуникации и науки за културно наследство“ за дистанционно обучение във ФБКН, УниБИТ. *Библиотека*, год. XXI, № 5, с. 65–71.

## References

- [1] Krasteva, R., Trencheva, T., Eftimova, S., & Todorova, T. (2014). Academic Education in Library and Information Management in Bulgaria. *Open Journal of Social Sciences*, 2(8), 160–171. DOI: 10.4236/jss.2014.28023.
- [2] Yankova, I., & Todorova, T. (2012). Digital Resources for Academic Education: Experiences from the Scientific Project “Data Base Bulgarian Revival Towns”. *Qualitative and Quantitative Methods in Libraries*, 1(3), 303–309.
- [3] European Commission. (2020). *Digital Education Action Plan 2021–2027: Resetting Education and Training for the Digital Age*. Brussels: European Commission
- [4] Miao, F., & Holmes, W. (2023). *Guidance for Generative AI in Education and Research*. Paris: UNESCO.
- [5] Yankova, I., Vasileva, R., & Stancheva, S. (2012). Learning by Doing in the Context of Modern Information and Media Literacy of Students in “Library and

## Разводът през призмата на антикризисното управление

### Divorce through the prism of anti-crisis management Развод скъзъм призму антикризисного управления

Проф. д-р Събев С.

Висше училище по агробизнес и развитие на регионите, Пловдив  
ssabev@uagd.bg

**Abstract:** This article examines divorce as a manageable exit from a family crisis by applying crisis management models to the family context. Through analogy with business practice, marriage is conceptualised as an organisation, and divorce is presented as a legitimate exit strategy from a crisis in which ossified relationships are terminated and a new beginning is established. The principal conclusion is that divorce, when managed rationally and with professional assistance, is not a defeat but an opportunity for post-crisis recovery and a more authentic life.

**Keywords:** CRISIS MANAGEMENT, DIVORCE, FAMILY CRISIS

#### 1. Увод

Когато се разработва антикризисен план за търговско дружество, се анализира организационната структура, ресурсите, външната среда, заинтересованите страни и рисковия профил. По аналогия семейството може да бъде описано като един вид корпоративна организация с определена структура (съпрузи, деца, родители на съпрузите), ресурси (материални и нематериални), цели (общи и индивидуални) и среда (социална, професионална, икономическа). В антикризисното управление, организацията преминава през жизнен цикъл, в който кризата не е аномалия, а закономерен етап. Всяка организирана система - било то предприятие или семейство, е подложена на вътрешни и външни въздействия, които постепенно или внезапно нарушават нейното равновесие. Кризата се разглежда като „крайно обостряне на вътрешноорганизационните отношения и отношенията с външната среда.“<sup>1</sup> Ако се заменят „вътрешноорганизационни“ с „вътрешносемейни“, се получава точно описание на семейната криза: крайно обостряне на отношенията между съпрузите, между родителите и децата, между семейството и заобикалящата го социална среда. Ключовата идея е, че кризата не е задължително край. Тя е повратна точка, от която са възможни два пътя: разпадане или обновление. В бизнеса корпоративната организация или се възстановява, или се ликвидира. В семейството аналогичните изходи са: или бракът се обновява на нова основа, или се прекратява. И двата изхода са легитимни. Проблемът не е в самата криза, а в неспособността тя да бъде своевременно разпозната и управлявана.

#### 2. Предпоставки и начини за разрешаване на проблема

В антикризисното управление на предприятието, кризите се класифицират по няколко критерия: по степен на предвидимост, по скорост на развитие, по обхват и по тежест на последиците. Същата класификация е приложима и към семейните кризи.

По степен на предвидимост семейните кризи биват очаквани и неочаквани. Очаквани са тези, които съпътстват естествените преходни периоди - раждане на дете, постъпване на дете в училище, навлизане в средна възраст, пенсиониране, синдромът на „празното гнездо“. Неочакваните възникват внезапно - изневяра, тежко заболяване, загуба на работа, пристрастяване.

По скорост на развитие се разграничават остри и хронични кризи. Острата семейна криза избухва внезапно - партньорът научава за изневяра, получава се физическо насилие, настъпва внезапна финансова катастрофа. Хроничната криза е бавно натрупване на неудовлетвореност, отчуждение, мълчание, рутина - онова, което в бизнеса обичайно се нарича „латентна криза“ или „пълзяща криза.“ В бизнеса латентната криза се проявява като постепенно намаляване на приходите, загуба на клиенти, демотивация на персонала - сигнали, които мениджмънтът често игнорира, защото всеки от тях поотделно изглежда поносим. По същия начин в семейството хроничната криза протича чрез постепенно отдалечаване, намаляване на комуникацията, загуба на физическа близост, отделни спални, разделени интереси - с игнали, които съпрузите често пренебрегват, защото всеки от тях поотделно изглежда преодолим.

Резултатът и в двата случая е един и същ: когато кризата най-накрая се прояви открито, натрупаните проблеми са толкова дълбоки, че възстановяването е непропорционално трудно или вече невъзможно.

Американският математик и икономист Игор Ансоф<sup>2</sup> разработва концепцията за „управление по слаби сигнали“ - идеята, че всяка криза преди да ескалира, излъчва ранни предупредителни знаци, които могат да бъдат уловени, ако управляващият е достатъчно внимателен.

Пренесено към семейството, „слабите сигнали“ за задаваща се криза включват следните белези: разговорите стават все по-кратки и все по-повърхностни, общите дейности намаляват - съпрузите прекарват свободното си време и почивките поотделно, конфликтите се повтарят по едни и същи теми без разрешение, единият или и двамата партньори започват да търсят емоционално убежище извън брака - в работата, в хобита, в социалните мрежи, при друг човек, физическата близост намалява или изчезва, съпрузите спират да планират общо бъдеще.

Проблемът е, че за разлика от бизнеса, семейството рядко разполага с формална система за мониторинг. Никой не провежда „ежемесечен анализ на семейните показатели.“ И точно тук се крие основната уязвимост - слабите сигнали остават незабелязани, докато кризата не се развие до точката, в която единственият реалистичен изход е прекратяването.

В антикризисното управление се разграничават няколко стратегии за реагиране на криза:

Стратегия на активна адаптация - организацията се променя, за да отговори на новите условия. В семейния контекст това е

<sup>1</sup> Коротков, Э. М. (2014). *Антикризисное управление*. Москва: Юрайт.

<sup>2</sup> Ansoff, H. I. (1975). Managing Strategic Surprise by Response to Weak Signals. *California Management Review*, 18(2), 21-33.

опитът за терапия, за промяна на правилата, за обновяване на отношенията. Тази стратегия заслужава да бъде опитана, но само ако и двамата партньори я споделят.

Стратегия на свиване - организацията съкращава дейности, за да оцелее. В семейството това е „бракът на хартия“ - двамата живеят под един покрив, но водят паралелни животи. Формално семейството съществува, но фактически е изпразнено от съдържание. Тази стратегия рядко е устойчива - тя консервира кризата, вместо да я разрешава.

Стратегия за излизане - организацията се ликвидира или се трансформира в нещо различно. Разводът е именно това - стратегия за излизане от криза, която вече не може да бъде преодоляна в рамките на съществуващата структура.

На това място е уместна аналогия от бизнес практиката. Когато се изготвя антикризисен план за малко търговско дружество, задължително се включват сценарии, свързани с прекратяване на дейността - загуба на наемен договор, неспечелване на търг, фалит на ключов клиент. Планирането на тези сценарии не е песимизъм, а реализъм. Търговецът, който е предвидил възможността за прекратяване, е в състояние да го осъществи организирано, с минимални загуби, с уредени задължения и със запазено достойнство. Търговецът, който отрича тази възможност, рискува хаотично разпадане.

Същата логика се прилага и в брака. Съпрузите, приемащи развода като легитимна възможност (без непременно да я желаят), са в състояние да го осъществят цивилизовано - с ясни споразумения, със защита интересите на децата, с уредени имуществени отношения. Тези, които го отричат до последния момент, обикновено преминават през разрушителен процес, от който никой не излиза победител.

### 3. Решение на проучения проблем

Ако се приложи технологичната схема на антикризисното управление<sup>3</sup> към процеса на развода, получаваме следната последователност:

**Етап 1 - Мониторинг (наблюдение).** Осъзнаване, че бракът е в криза. Честен анализ на отношенията - какво работи и какво не. Консултация с психолог или семеен терапевт.

**Етап 2 - Събиране на информация.** Изясняване на правната рамка - какви са възможностите по Семейния кодекс (развод по взаимно съгласие по чл. 50 СК или по исков ред по чл. 49 СК). Консултация с адвокат. Анализ на имущественото състояние, на въпросите за родителските права, за издръжката, за използване на семейното жилище.

**Етап 3 - Диагностика.** Вземане на решение: дали кризата е преодолима (и двамата са готови да работят за промяна) или е достигнала прага на необратимост. Ключовият въпрос не е „кой е виновен“, а „възможно ли е възстановяването.“

**Етап 4 - Разработване на антикризисни мерки.** Ако решението е развод - планиране на процеса: избор на процедура (по взаимно съгласие - по-бърза, по-евтина, по-щадяща, или по исков ред - когато съгласие е невъзможно), уреждане на имуществените отношения, определяне на режима на родителски права и лични отношения с децата, уреждане на финансовите въпроси (издръжка, кредити, общи задължения).

**Етап 5 - Система за реализация.** Определяне на „кризисния екип“ - адвокат, психолог (за децата и за самите съпрузи), счетоводител (за сложните имуществени казуси), медиатор (при развод по взаимно съгласие). Разпределяне на ролите и отговорностите.

**Етап 6 - Проверка на качеството.** Преглед на споразумението - защитени ли са интересите на децата? Справедливо ли е имущественото разпределение? Реалистични ли са уговорките

за издръжка? Обикновено адвокатът е този, който осигурява „проверката на качеството“ на антикризисната програма.

**Етап 7 - Реализация.** Подаване на молба за развод, провеждане на съдебното производство, влизане в сила на решението.

**Етап 8 - Прогнозиране.** Планиране на бъдещето - как ще функционира „новата организация“ (разделените домакинства, съвместното родителство, личното развитие). Какви нови кризи могат да възникнат (конфликти около децата, финансови затруднения, нови партньори) и как да бъдат предотвратени.

В търговското право съществува разликата между принудителна ликвидация (по съдебен ред, при несъстоятелност) и доброволна ликвидация (по решение на собствениците). Доброволната ликвидация е организиран, предвидим, контролируем процес. Задълженията се уреждат, активите се разпределят, служителите получават дължимото. Разводът по взаимно съгласие (чл. 50 от Семейния кодекс) е аналогът на доброволната ликвидация. Съпрузите се споразумяват по всички въпроси: местоживее на децата, лични отношения, издръжка, ползване на семейното жилище, имуществени отношения. Съдът разглежда делото и одобрява споразумението в едно заседание, ако то не противоречи на закона и на интересите на децата.

Предимствата на този вариант са очевидни: значително по-кратко производство, по-ниски разходи, минимален емоционален стрес, запазване на възможността за нормална комуникация между бившите съпрузи - което е от решаващо значение, когато има деца.

Разводът по исков ред (чл. 49 СК) е „принудителната ликвидация“ - единият от съпрузите иска прекратяване, а другият се противопоставя или двамата не могат да постигнат съгласие по условията. Този процес е по-продължителен, по-скъп и неизмеримо по-болезнен. Съдът решава въпросите, които съпрузите не са успели да решат сами, а това почти винаги означава, че поне една от страните е неудовлетворена.

Ролята на адвоката е да убеди, когато е възможно, клиентите да изберат „меката ликвидация.“ Не защото е по-лесна за него<sup>4</sup>, а защото е обективно по-добра за всички засегнати - включително и особено за децата.

Децата са заинтересованите страни, които нямат глас. Във всеки антикризисен план задължително се идентифицират заинтересованите страни - лицата, които са засегнати от кризата и чиито интереси трябва да бъдат защитени. Когато съставяме антикризисен план за предприятие, ние включваме не само собствениците и мениджърите, но и служителите, клиентите, доставчиците, общността.

При развода децата са най-уязвимите заинтересовани страни. Те са засегнати от кризата, но нямат глас при вземането на решенията. Нямат опит, нямат правна дееспособност, нямат емоционалните инструменти да обработят случващото се. Те са „служителите“ на семейната организация - зависими, лоялни и най-силно ударени от „ликвидацията.“

Антикризисният подход изисква защитата на децата да бъде приоритет номер едно - не като абстрактен принцип, а като конкретен набор от действия: децата не са оръжие и не са трофей в спора между съпрузите, комуникацията с децата трябва да бъде подготвена, честна и съобразена с възрастта им, и двамата родители запазват правото и задължението си да бъдат родители, независимо от прекратяването на брака, при необходимост се ангажира детски психолог, споразумението за родителски права се изготвя с мисъл за дългосрочния интерес на детето, а не за краткосрочната победа на единия родител.

В антикризисното управление финансовият анализ е неизбежен. Когато предприятие е в криза, първото, което

<sup>3</sup> По Коротков

<sup>4</sup> Въпреки, че в този случай и хонорарът е по-нисък.



антикризисният екип прави, е да оцени активите и пасивите, да определи ликвидността, да приоритизира задълженията.

При развода финансовият анализ е не по-малко важен. Съпругеската имуществена общност подлежи на делба. Общите задължения (кредити, ипотечи) трябва да бъдат разпределени. Издръжката на децата трябва да бъде определена реалистично - нито символично ниска, нито прекомерно висока.

Антикризисният подход тук означава: разглеждане на имуществените въпроси рационално, а не емоционално, отделяне на имущественото от емоционалното - къщата не е символ на предателство, а актив, който трябва да бъде разпределен, реалистична оценка на финансовите последици за всяка от страните, планиране на преходния период - първите 6–12 месеца след развода са финансово най-трудните.

Последната и може би най-важната стъпка от кризисното управление е ученето - извличането на поуки от кризата и използването им за изграждане на по-добро бъдеще.

#### 4. Резултати и дискусии

Разводът не е краят на историята. Той е краят на една глава и началото на друга. „Посткризисното възстановяване“ в семейния контекст включва:

Емоционално възстановяване. Отделяне на време за осмисляне на преживяното. Осъзнаване, че скръбта по загубеното е нормална, но не трябва да се превръща в хроническо състояние. При необходимост - работа с психолог.

Преструктуриране на ежедневието. Създаване на нов ритъм, нови навици, нов дом. Подобно на предприятие, което след кризата изгражда нова организационна структура, разведеният човек изгражда нова житейска структура.

Ново съвместно родителство. Когато има деца, бившите съпрузи продължават да бъдат партньори -в родителството. Изграждането на работещ модел за съвместно родителство е може би най-трудната, но и най-важната задача след развода.

Ново начало. Разводът освобождава от модели, които са спрели да работят. Той дава възможност за предефиниране -на приоритетите, на ценностите, на начина на живот. Хората, които успяват да погледнат на развода не като на поражение, а като на управляем преход, излизат от него по-силни, по-наясно със себе си и по-готови за бъдещето.

Антикризисното управление ни учи на нещо фундаментално: кризата е неизбежна, но хаосът -не. Кризата може да бъде управлявана. Може да бъде анализирана, планирана, овладяна. Може дори да бъде превърната във възможност.

Разводът е криза и в това няма спор. Но като всяка криза, той може да бъде преживян в хаос или управляван с разум. Изборът между двете зависи от готовността на съпрузите да погледнат на ситуацията рационално, от качеството на професионалната помощ (адвокат, психолог, медиатор) и от способността да се постави интересът на децата над личната обида.

#### 5. Заключение

Моделите на антикризисен мениджмънт, създадени за бизнес средата, се оказват изненадващо точни, когато се приложат към семейната криза. Мониторингът на ранните сигнали, стратегическият избор между възстановяване и прекратяване, ограничаването на щетите, защитата на заинтересованите страни, организираната ликвидация, посткризисното възстановяване -всичко това е приложимо и в контекста на брачните отношения.

В крайна сметка разводът е отговор на въпроса, който антикризисното управление поставя в най-чистия му вид: Когато старата организация вече не може да изпълнява своята

мисия, по-добре ли е да я поддържаме изкуствено или да я прекратим с достойнство и да дадем на участниците в нея възможност за ново начало?

Отговорът в бизнеса е ясен. Отговорът в семейното право би трябвало да е също толкова ясен.

#### 6. Литература:

1. Коротков, Э. М. Антикризисное управление. Москва: Юрайт, 2014.
2. Luecke, R. Crisis Management: Master the Skills to Prevent Disasters. Boston: Harvard Business School Press 2004.
3. Mitroff, I. I. (1988). Crisis management: Cutting through the confusion. Sloan Management Review, 29(2), 15–20.
4. Ansoff, H. I. (1975). Managing Strategic Surprise by Response to Weak Signals. California Management Review, 18(2), 21–33.
5. Coombs, W. T. (2015). Ongoing Crisis Communication: Planning, Managing, and Responding (4th ed.). Thousand Oaks: SAGE Publications.

# Антикризисно управление на микропредприятия в България

## Crisis management of microenterprises in Bulgaria Антикризисное управление микропредприятиями в болгарии

Проф. д-р Събев С.

Висше училище по агробизнес и развитие на регионите, Пловдив  
ssabev@uad.bg

**Abstract:** The report analyses the specifics of anti-crisis management in microenterprises in Bulgaria as the most numerous, yet one of the most vulnerable categories of economic entities. A resource-efficient model is proposed, focused on liquidity, operational flexibility and early warning. The main conclusion is that the resilience of microenterprises does not depend on complex management systems, but rather on timely financial discipline, diversification and rapid adaptation of the business model.

**Keywords:** MICROENTERPRISES, ANTI-CRISIS MANAGEMENT, LIQUIDITY, CRISIS RESILIENCE, SMALL BUSINESS, BULGARIA

### 1. Увод

Микропредприятията са съществен елемент от стопанската структура на нашата родина. Тяхната численост и способност да създават заетост ги превръщат в важен фактор за икономическата активност, особено на местно равнище. Именно малкият мащаб обаче, поражда специфична уязвимост: ограничен капиталов резерв, зависимост от малък кръг клиенти и доставчици, затруднен достъп до банково финансиране и концентрация на управленските функции в собственика - управител.

Сътресенията през последните години - последиците от глобалната финансова криза, пандемията от COVID-19, войните в Украйна и Иран, енергийно-инфлационният натиск и нарушените вериги на доставки - показваха, че микропредприятията често реагират не чрез предварително планирана антикризисна система, а чрез интуитивни и закъснели действия. Това прави проблема не само икономически, но и управленски: моделите, разработени за средни и големи организации, не могат механично да се пренасят върху предприятия с под десет заети лица.

Обект на изследването са микропредприятията в България. Предмет са управленските подходи, инструментите и институционалните механизми за превенция, овладяване и преодоляване на кризи в тази категория предприятия. Целта е да се систематизира концептуална рамка на антикризисното управление и да се предложи практически приложим модел, съобразен с ресурсните ограничения на микрофирмите.

Защитаваната теза е, че при микропредприятията антикризисното управление следва да бъде опростено, измеримо и вградено в ежедневното управление. Неговият център не е формалният кризисен план, а управлението на ликвидността, ранното разпознаване на влошаващи се показатели и способността за бърза оперативна промяна.

Използван е документален и нормативен анализ на действащото българско законодателство, официални статистически данни и институционални източници, свързани с малките и средните предприятия. Подходът е аналитико-синтетичен: първо се очертават нормативните и икономическите предпоставки, след което се извежда приложим управленски модел. Изследването има приложен характер. То не претендира да замести емпирично проучване върху представителна извадка от микропредприятия, а цели да формулира управленска рамка, която може да бъде използвана от собственици - управители, консултанти и публични институции при разработване на мерки за повишаване на кризисната устойчивост.

Основното ограничение е документалният характер на анализа. Изводите се основават на нормативни и статистически източници, без самостоятелно емпирично проучване сред микропредприятия.

В българското право съществуват две различни, но практически важни дефиниции на микропредприятието. Първата има регулаторно-политическа функция и се съдържа в чл. 3, ал. 3 от Закона за малките и средните предприятия<sup>1</sup>. Микропредприятия са предприятия със средносписъчен брой на персонала под 10 души и годишен оборот, който не превишава 2 000 000 евро, и/или стойност на активите, която не превишава 2 000 000 евро. Тази дефиниция е свързана с политиките за насърчаване на МСП, достъпа до публична подкрепа и прилагането на европейските правила за държавни помощи.

Втората дефиниция има счетоводно - отчетна функция и се съдържа в чл. 19, ал. 2 от Закона за счетоводството.<sup>2</sup> По тази линия микропредприятия са предприятия, които към 31 декември на текущия отчетен период не надвишават най-малко два от следните три показателя: балансова стойност на активите - 450 000 лева<sup>3</sup>, нетни приходи от продажби - 900 000 лева<sup>4</sup>, средна численост на персонала - 10 души. Практическият извод е ясен: понятието „микропредприятие“ трябва винаги да се използва с уточнение за целите на кой закон се прилага.

За целта на настоящото изследване използваме второто легално определение, тъй като целта е да анализираме предприятия разполагащи с минимални ресурси. Най-вече това са предприятия, тип семеен бизнес, в които наетите лица са основно членовете на семейството на собственика, за които кризата е неочакван удар и често води до прекратяване на бизнеса.

### 2. Предпоставки и начини за разрешаване на проблема

Каналите на кризисно въздействие могат да бъдат сведени до три основни групи: спад на приходите поради свиване на търсенето, ръст на разходите поради поскъпване на енергия, суровини, транспорт или труд, и затруднен достъп до финансиране поради забавени плащания, по-строги банкови изисквания или липса на обезпечения. Тези канали действат едновременно и мултиплицират ефекта си.

Структурните уязвимости на микро предприятията са резултат от самия им мащаб: тънък ликвиден буфер, силна зависимост от собственика - управител, ограничена възможност за юридически, финансов и аналитичен консултантски капацитет, тесен кръг контрагенти, ниска преговорна сила спрямо банки, доставчици и големи клиенти, висока чувствителност към всяка административна тежест. Затова при системни шокове именно микропредприятията са сред първите, които усещат кризата, и сред последните, които се възстановяват.

<sup>1</sup> ДВ, бр. 84 от 24.09.1999 г., с изменения и допълнения

<sup>2</sup> ДВ, бр. 95 от 08.12.2015 г., в сила от 01.01.2016 г., с последващи изменения и допълнения

<sup>3</sup> След превалутиране 230 081 €

<sup>4</sup> След превалутиране 460 163 €

Антикризисното управление представлява система от действия за предотвратяване, подготовка, реакция и възстановяване при кризи. В класическия си вариант то включва четири фази: превенция и ранно предупреждение, подготовка и готовност, реакция и овладяване, възстановяване и извличане на поуки.

Това разбиране е трайно установено в теорията. В класическите учебници по антикризисно управление, понятието се определя по следния начин: „антикризисното управление е управление, в което по определен начин са заложени предвиждането на опасността от криза, анализът на нейните симптоми, мерките за намаляване на отрицателните последици от кризата и използването на нейните фактори за последващото развитие“<sup>5</sup>.

Сходна е логиката и в практически ориентираната управленска литература. Ричард Люки предлага практическа рамка за стабилизиране и последващо овладяване на непредвидена криза, изградена като последователност от етапи: преглед и приоритизиране на потенциалните рискове, предотвратяване на предотвратимото, планиране за извънредни ситуации, разпознаване на кризата, ограничаване на щетите, разрешаване на кризата и извличане на поуки от натрупания опит. Според Люки ефективното антикризисно управление започва не в разгара на извънредната ситуация, а в спокойните периоди - с цялостен одит на рисковете на организацията, тяхното приоритизиране и предварителна подготовка за реакция<sup>6</sup>.

При микропредприятията този цикъл трябва да бъде максимално опростен. Няма смисъл от обемисти планове, които собственикът няма време и опит да прилага. Смисъл имат кратък набор показатели, ясни прагове за реакция и предварително планирани действия - резервна кредитна линия, списък с алтернативни доставчици, режим за ускорено събиране на вземанията и план за временно намаляване на фиксираните разходи. При антикризисното управление в пълна сила важи правилото за седемте П: Правилното предварително планиране предпазва от последващ пълен провал.

Реалната антикризисна култура при микрофирмите се измерва не с наличието на папка „кризисен план“, а с дисциплината да се следят парите, клиентите, задълженията и зависимостите. Ако тези четири неща са извън контрол, всяка по-сложна стратегия е само хартия.

### 3. Решение на пророчения проблем

Предлаганото решение е ресурсно пестелив модел на антикризисно управление, центриран върху ликвидността и гъвкавостта. Моделът се основава на три принципа: малък брой измерими показатели, предварително определени управленски реакции, и минимална административна тежест за собственика-управител.

Разглеждаме три групи инструменти. На първо място са финансовите, изразяващи се в управление на ликвидността, събираемост на вземанията, контрол на разходите и предварително финансиране.

В центъра на модела стои ежедневният контрол върху паричните потоци. Микрофирмата трябва да знае не само каква печалба очаква, а с какви налични средства ще разполага през следващите 30, 60 и 90 дни. В кризисна ситуация счетоводната печалба е второстепенна, решаваща е платежоспособността.

Забавените плащания са един от най-бързите механизми за пренасяне на криза към микропредприятието. Необходим е предварителен режим за кредитиране на клиенти: срокове, лимити, напомняния, частични аванси, договорни неустойки и отказ от нови доставки при системно просрочие.

Разходите следва да се разделят на жизнено необходими, отложими и прекратими. В криза първата реакция не трябва да бъде паническо съкращаване на всичко, а запазване на разходите, които генерират приходи, и ограничаване на тези, които само поддържат комфорт.

Втората група са оперативните инструменти.

Оперативната гъвкавост е естественото предимство на малкия мащаб. Тя се реализира чрез бързо приспособяване на предлагането към промененото търсене, преминаване към по-кратки производствени и доставни цикли, намаляване на складовите наличности, алтернативни доставчици, дигитални канали за продажби и временно свиване на дейността до жизнеспособно ядро.

Ключова грешка при микрофирмите е зависимостта от един голям клиент или един критичен доставчик. Това изглежда удобно в нормална среда, но в криза се превръща в управленски капан. Минималното изискване е собственикът да знае какъв дял от приходите идва от тримата най-големи клиенти и кои доставки нямат реална алтернатива.

Накрая следва да разгледаме и стратегическите инструменти. В по-дълъг хоризонт устойчивостта се изгражда чрез адаптиране на бизнес модела: навлизане в по-малко циклични сегменти, развитие на електронна търговия, участие в партньорски мрежи, споделено използване на ресурси и коопериране с други микрофирми. За малкия бизнес кооперирането не е романтична идея, а чиста икономическа необходимост: самостоятелно микро предприятието рядко има достатъчно мащаб, за да договаря добри условия.

**Таблица 1.** Минимална система за ранно предупреждение при микропредприятие

| Индикатор                 | Какво показва                                          | Ориентировъчен сигнал за риск                                            | Първа управленска реакция                                                  |
|---------------------------|--------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|
| Паричен резерв            | Колко дни фирмата може да плаща текущите си задължения | Резерв под 30 дни оперативни разходи                                     | Замразяване на отложими разходи, ускорено събиране на вземания             |
| Просрочени вземания       | Риск от блокиране на оборотния капитал                 | Нарастване два поредни месеца или значителен дял над договорните срокове | Активно напомняне, авансови плащания, лимитиране на нови доставки          |
| Концентрация на приходите | Зависимост от малък брой клиенти                       | Един клиент формира над 30% от приходите                                 | Търсене на нови канали, договорни гаранции, диверсификация                 |
| Критичен доставчик        | Оперативна зависимост                                  | Липса на реална алтернатива за ключова доставка                          | Предварителни оферти от втори доставчик, минимален резерв                  |
| Месечни продажби          | Ранен сигнал за свиване на търсенето                   | Спад два последователни месеца                                           | Корекция на асортимента, промоционален пакет, преглед на цените            |
| Фиксирани разходи         | Степен на негъвкавост на модела                        | Фиксирани разходи, които не могат да се намалят при спад на приходите    | Предоговаряне на наеми, услуги и абонаменти, аутсорсинг вместо придобиване |

<sup>5</sup> Антикризисное управление: Учебник для вузов. — 2-е изд., доп. и перераб. / Под ред. проф. Э. М. Короткова. — М.: ИНФРА-М, 2008

<sup>6</sup> Люки, Р. Управление на кризи. Прогнозиране и преодоляване, Класика и стил, С.2007

Таблица 1 представя индикаторите за предстояща криза в синтезиран вид, но практическата им стойност зависи от това дали собственикът разбира какво точно измерва всеки от тях, кога сигналът е тревожен и с какви действия разполага. Разгледаните тук индикатори превръщат разпръснати симптоми в малък брой измерими величини с предварително определени прагове.

Използваемостта на системата се крепи на три принципа. Първо: измеримост без специализиран софтуер - всеки индикатор трябва да може да се изчисли от касовата наличност, банковите извлечения, издадените и получените фактури и оборотната ведомост. Второ: периодичност - паричната позиция се следи седмично, останалите индикатори месечно, в рамките на препоръчания месечен антикризисен преглед. Трето: предварително дефинирана реакция - прагът има смисъл само ако преминаването му задейства предварително решено действие, а не тепърва започващо обмисляне.

Индикаторът Паричен резерв (дни на покритие) отговаря на въпроса колко дни фирмата може да продължи да плаща текущите си задължения, ако постъпленията спрат изцяло. Изчислява се, като наличните парични средства се разделят на среднодневните оперативни разходи. Прагът от 30 дни не е произволен: под това равнище почти всяко по-сериозно смущение - забавено плащане от голям клиент, повреда на оборудване, внезапен извънреден разход - се пренася директно върху платежоспособността. Индикаторът има и правно измерение. Съгласно чл. 608, ал. 1 от Търговския закон неплатежоспособен е търговец, който не е в състояние да изпълни изискуемо парично задължение, породено от или отнасящо се до търговска сделка, публичноправно задължение към държавата и общините, свързано с търговската му дейност, или задължение за изплащане на трудови възнаграждения, а чл. 626, ал. 1 ТЗ задължава длъжника, станал неплатежоспособен или свръхзадължен, в 30-дневен срок да поиска откриване на производство по несъстоятелност. Следенето на паричния резерв следователно не е само икономическа дисциплина, а и ранна защита срещу правните последици от закъснялата реакция.

Решенията на собственика тук са степенувани. Превантивно: поддържане на резерв, покриващ един до три месеца критични разходи, предварително договорена кредитна линия или овърдрафт, стриктно разделяне на личните от фирмените средства, кратка седмична справка за паричната позиция. При активиран сигнал: незабавно замразяване на отложимите разходи, ускорено събиране на вземанията, договаряне на разсрочване с доставчици преди падежа, а не след него, активиране на резервното финансиране, докато фирмата все още е кредитоспособна. Грешката, която моделът цели да изключи, е търсенето на финансиране едва когато затруднението е станало видимо и за кредиторите.

Индикаторът просрочени вземания улавя пренасянето на чужда криза върху предприятието: клиент в затруднение често финансира дейността си чрез забава към доставчиците. Измерването става чрез така нареченото стареене на вземанията - разпределението им по интервали на забава (до 30, от 31 до 60 и над 60 дни) и чрез дела на просрочените вземания в общия им обем. Тревожна е не толкова моментната стойност, колкото динамиката: нарастване два поредни месеца. Правната уредба дава на микромалкото предприятие повече опора, отколкото обикновено се използва: чл. 303а, ал. 1 ТЗ по принцип ограничава договорния срок за изпълнение на парично задължение между търговци до 60 дни, а при липса на уговорен срок ал. 3 предвижда изпълнение в 14-дневен срок от получаване на фактура или покана за плащане. Отделно дълготрайното толериране на просрочия крие и правен риск по веригата: неудовлетвореното в продължение на месеци вземане може да е външен белег на неплатежоспособност на длъжника, което налага експозицията към него да бъде ограничена своевременно.

Превантивните решения включват писмена кредитна политика дори при малък брой клиенти -кой получава отсрочка, до какъв лимит и при какви условия, авансови или междинни плащания при поръчки с дълъг цикъл, изрично уговорени падежи вместо неопределени уговорки, при по-рискови контрагенти - подходящи обезпечения. При активиран сигнал: напомняне по предварително определен график още в първите дни на забавата, спиране на нови доставки за просрочилия клиент, договаряне на погасителен план с писмено признание на задължението, при трайно неизпълнение -своевременно пристъпване към събиране по правен ред, преди вземането да е обезценено от времето.

Прагът от 30% за един клиент отбелязва точката, отвъд която загубата на едно търговско отношение елиминира близо една трета от приходите -при тънък ликвиден буфер това е равнозначно на незабавна криза. Концентрацията на приходите има и по-малко видим ефект: тя подкопава преговорната позиция на микрофирмата, която приема удължени срокове за плащане и ценови натиск, защото не може да си позволи конфликт с решаващия клиент. Измерването е тривиално - оценка на дела на най-големия клиент и на тримата най-големи клиенти в приходите за последните дванадесет месеца.

Превантивно собственикът може да въведе вътрешен лимит за максимален дял на един клиент, да развива целенасочено втори канал за продажби, включително електронна търговия, да уреди отношенията с ключовия клиент в рамков договор с ясни срокове за плащане и разумно предизвестие при прекратяване. При активиран сигнал: изготвяне на конкретен сценарий „загуба на ключовия клиент“ с разписани стъпки, пренасочване на търговското усилие към по-малки клиенти дори при пониска моментна доходност - разликата е цената на застраховката срещу зависимостта, при преговори с ключовия клиент - съзнателно отстояване на договорната дисциплина, вместо мълчаливо приемане на едностранни промени.

Критичният доставчик е симетричния образ на клиентската концентрация. Липсата на реална алтернатива за ключова доставка означава, че прекъсване, забава или едностранно поскъпване при доставчика се превръща незабавно в неизпълнение на предприятието към собствените му клиенти. Проверката е чрез прост мисловен тест: ако утре критичният доставчик спре да доставя, колко дни можем да изпълняваме поръчките си? Ако отговорът е „дни, а не седмици“, индикаторът е активиран независимо от текущото добро състояние на отношението.

Превантивните решения са познати, но изискват дисциплина: втори одобрен доставчик, поддържан с периодични малки поръчки, така че отношението да е реално, а не хипотетично, минимален складов буфер за критичните позиции, съобразен с цикъла на доставка, изрично договорени срокове и последици при неизпълнение, коопериране с други микрофирми за съвместно снабдяване и по-добри условия. При активиран сигнал: незабавно активиране на алтернативния канал дори при по-висока цена, приоритизиране на изпълнението към клиентите с най-голямо значение, откриване комуникация със засегнатите клиенти преди, а не след пропуснатия срок.

Месечните продажби са следващият важен индикатор за предстояща криза. Спадът два последователни месеца е ориентиращият сигнал, но интерпретацията му изисква внимание: най-трудното е разграничаването на сезонно колебание от начало на трайно свиване. Затова сравнението трябва да бъде двойно - с предходния месец и със същия месец на предходната година. Продажбите са най-ранният от шестте индикатора: свиването им изпреварва с месеци проблемите с ликвидността и именно това дава време за реакция, ако сигналът не бъде отхвърлен с обяснението, че „пазарът просто е слаб този месец“.

Решенията при активиран сигнал са предимно пазарни: корекция на асортимента към по-търсените позиции, преглед



на цените и в двете посоки - сяпото сваляне на цени при спадът търсене често задълбочава загубата, промоционален пакет към съществуващи клиенти, чието активиране е по-евтино от привличането на нови, пряка обратна връзка от последните загубени клиенти, пробен нов канал за продажби. Успоредно с пазарните мерки собственикът следва да подготви и разходната страна, така че при трети пореден месец на спад фирмата да премине в кризисен режим по предварително готов план, а не в импровизация.

Индикаторът фиксирани разходи измерва структурната гъвкавост на бизнес модела. Висок дял на фиксирани разходи означава, че при спад на приходите загубата настъпва бързо и не може да бъде овладяна само с оперативни мерки - това е ефектът на оперативния лост в неговата опасна посока. Практическото измерване е прост стрес-тест: какъв би бил месечният резултат при спад на приходите с 20–30% и колко месеца предприятието може да издържи този резултат с наличния паричен резерв. Ако отговорът е по-малко от три месеца, моделът е прекалено твърд за средата, в която работи.

Превантивно решение е системното предпочитане на променливи пред фиксирани ангажменти: наем вместо покупка, аутсорсинг вместо щатна позиция за спомагателните дейности, абонаменти с кратко предизвестие, клаузи за предоговаряне в по-дългосрочните договори. При активиран сигнал: предоговаряне на наеми, услуги и абонаменти преди натрупването на задължения, отказ от прекратимите разходи при запазване на разходите, които носят приходи, временно преминаване към по-малки помещения или споделени ресурси, когато това е съвместимо с дейността.

Накрая, шестте индикатора работят като система, а не поотделно. Един активиран сигнал изисква повишено внимание и корекции. Два или повече едновременно активирани сигнала следва да задействат кризисен режим: седмично следене на всички показатели, замразяване на отложимите разходи, ускорено събиране на вземанията и активиране на предварително договореното финансиране. Резултатите от месечния преглед е добре да се документират на една страница - шестте стойности и взетите решения. Документирането има двойна функция: прави тенденциите видими във времето и осигурява доказателство за добросъвестно и навременно управление, ако въпреки всичко кризата ескалира до производство по несъстоятелност.

#### 4. Резултати и дискусия

Основният резултат от анализа е, че кризисната устойчивост на микропредприятието се повишава не чрез усложняване на управлението, а чрез дисциплиниране на малък набор критични процеси. На ниския ликвиден буфер се противопоставят паричният резерв и предварителното финансиране, на зависимостта от единичен контрагент - диверсификацията, на ограничения капацитет - минималната система за ранно предупреждение, на слабата преговорна сила - кооперирането и предварителното договаряне.

Анализът потвърждава, че корпоративните модели на антикризисно управление са слабо приложими към микропредприятията. Причината е проста: те изискват персонал, време, информация и административен капацитет, с които микропредприятията обичайно не разполагат. Ако моделът е прекалено сложен, той няма да бъде използван. Следователно работещият модел трябва да бъде ясен и приложим веднага. Този извод кореспондира и с българската литература по предприемачество, в която управлението на малките и средните предприятия отдавна е открито като самостоятелна изследователска и практическа област със собствена специфика.<sup>7</sup>

Факторът време е решаващ. За голяма организация временният спад в приходите може да бъде управляем чрез резерви, кредитиране и вътрешно преразпределение. За микропредприятието същият спад може да се превърне в неплатежоспособност за седмици. Затова ранното предупреждение при микропредприятията не е аналитичен лукс, а условие за оцеляване.

Публичната намеса също трябва да бъде проектирана през логиката на микробизнеса. Мярка, която изисква сложна документация, дълги срокове и експертно попълване, на практика дискриминира най-малките предприятия. За тях скоростта и простотата често са по-важни от номиналния размер на помощта.

На равнище предприятие се препоръчва въвеждане на кратък месечен антикризисен преглед, който да включва: налични парични средства, просрочени вземания, предстоящи плащания, концентрация на приходите, зависимост от ключови доставчици и промяна в продажбите. Този преглед може да бъде в обикновена електронна таблица, не е нужна тежка система.

Собственикът - управител следва да поддържа минимален ликвиден резерв и предварително договорен достъп до финансиране. Практическият минимум е предприятието да има готовност и да знае как ще покрие поне един месец критични разходи при внезапен спад на приходите.

Необходимо е системно намаляване на зависимостта от единични клиенти и доставчици. Това включва търсене на алтернативни канали, базова дигитализация, договорна дисциплина и отказ от прекалено рискови продажби на отложено плащане.

На институционално равнище публичните мерки трябва да бъдат проектирани с приоритет към административната достъпност и бързина. За микропредприятията помощта, която идва след края на кризата, е почти безполезна.

#### 5. Заключение

Микропредприятията съчетават значима икономическа роля с висока чувствителност към кризи. Тяхната устойчивост не може да се гради върху копиране на корпоративни антикризисни модели. Тя изисква по-прост и по-трезв подход: контрол върху паричния поток, ранно разпознаване на риска, оперативна гъвкавост и ограничаване на зависимостите.

Най-надеждната антикризисна стратегия за микрофирмата е да не чака кризата. Когато собственикът започне да следи критичните показатели едва след като приходите вече са паднали, времето за реакция често е загубено. Затова антикризисното управление трябва да бъде част от нормалното управление, а не извънредна процедура, активирана постфактум.

#### 6. Литература

1. Коротков, Э. М. (ред.). Антикризисное управление: Учебник. Москва: ИНФРА-М, 2003. 432 с.
2. Коротков, Э. М. Антикризисное управление: Учебник для бакалавров. Москва: Издательство Юрайт, 2014.
3. Luecke, R. Crisis Management: Master the Skills to Prevent Disasters. Harvard Business Essentials Series. Boston, MA: Harvard Business School Press, 2004. Българско издание: Управление на кризи. Прогнозиране и преодоляване. София: Класика и стил, 2006.
4. Тодоров, К. Стратегическо управление в малките и средните фирми. Том 1–2. София: Сиела, 2001.

<sup>7</sup> Тодоров К., Стратегическо управление в малките и средни фирми, Сиела, С 2001

# Artificial intelligence in learning and development: transforming corporate learning

Yoana Stefanova  
University of Sofia – Sofia, Bulgaria  
Email: yvstefanov@uni-sofia.bg

**Abstract:** Artificial Intelligence (AI) is rapidly transforming Learning and Development (L&D) by enabling personalized learning experiences, accelerating content creation, improving multilingual delivery, and supporting data-driven decision-making. While current adoption predominantly focuses on content production efficiency, the strategic use of AI for workforce development and skills management remains underdeveloped. This paper examines the role of AI-based training solutions in corporate learning ecosystems, drawing on recent industry research and insights from qualitative interviews with three learning and development experts. The study discusses opportunities, implementation challenges, ethical considerations, and the emerging shift toward AI-native learning platforms. Recommendations for future implementation and research are provided.

**Keywords:** ARTIFICIAL INTELLIGENCE, LEARNING AND DEVELOPMENT, ADDIE, LMS, LXP, AI-NATIVE SYSTEMS, CORPORATE LEARNING, PERSONALIZED LEARNING

## 1. Introduction

The integration of Artificial Intelligence (AI) into business operations has become a strategic priority for organizations seeking to remain competitive in rapidly changing markets. Learning and Development (L&D) functions are particularly affected by this transformation because workforce capabilities increasingly determine organizational adaptability and innovation. Traditional corporate learning approaches often rely on standardized training programs that fail to address diverse learner needs, skill levels, and career aspirations [1, 2]. AI technologies introduce the possibility of personalized learning pathways, automated content generation, learner analytics, intelligent coaching systems, and adaptive learning environments [3].

According to the most recent report by the world's leading AI video platform for business, Synthesia, AI adoption is widespread within L&D departments, although implementation remains concentrated primarily on content creation activities rather than strategic learning management. Consequently, many organizations have yet to fully realize AI's potential to align learning initiatives with business objectives and measurable performance outcomes [4].

The purpose of this paper is to examine how AI-based tools and solutions are reshaping corporate learning ecosystems and to identify opportunities and challenges associated with their implementation.

## 2. Prerequisites and Means for Solving the Problem

### 2.1 Evolution of Digital Learning Platforms

Corporate learning ecosystems have evolved from traditional Learning Management Systems (LMSs) toward Learning Experience Platforms (LXPs). LMSs primarily provide content storage, administration and compliance and certification tracking, whereas LXPs focus on learner engagement, personalization, and recommendation mechanisms. This shift “is not merely a technological upgrade but signifies a more profound philosophical shift in our approach to learning” [5, 6].

Recent developments indicate an even further step in the LXPs, namely the emergence of AI-native platforms designed around artificial intelligence from their inception. Such platforms integrate generative AI, learner analytics, adaptive pathways, and automated content creation into their fundamental architecture rather than adding AI capabilities as supplementary features [7].

Current AI-powered solutions support the automated generation of learning content, the translation and localization of training materials, and the adaptation of content for multilingual audiences. Furthermore, AI enables skills mapping and competency analysis, helping organizations identify development needs and workforce skill gaps. Learning experiences can be further enhanced

through personalized learning pathways, adaptive learning environments, virtual tutors, and AI-powered coaching assistants. In addition, AI tools provide learner analytics and predictive insights, allowing Learning and Development professionals to make more data-driven decisions and continuously improve training effectiveness. Finally, AI can support the automatic generation and evaluation of assessments, contributing to a more efficient and scalable learning ecosystem [8].

Research further suggests that AI can assist organizations in identifying workforce skill gaps and providing more accurate recommendations for future development needs [9].

### 2.2 The ADDIE Model as a Theoretical Framework

The present study adopts the ADDIE model (Fig. 1) as its theoretical framework for analyzing the integration of Artificial Intelligence (AI) into Learning and Development (L&D) processes. ADDIE is one of the most widely recognized instructional design models and consists of five sequential phases: Analysis, Design, Development, Implementation, and Evaluation. Originally developed for the U.S. Army to provide a systematic approach to training design, the model was later adopted for corporate learning practices and continues to serve as a foundation for modern learning today.

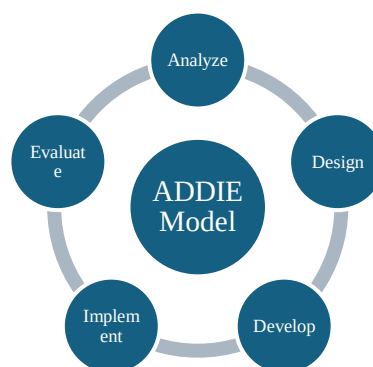


Fig. 1 The ADDIE Model

The Analysis phase focuses on identifying business objectives and skill gaps. The second stage, Design, determines goals and tools to accomplish them. It is the primary planning phase of the instructional design process. The Development phase translates the design specifications into tangible learning materials and training resources. These resources are subsequently deployed during the Implementation phase, in which the learning intervention is delivered to the target audience. The process concludes with the Evaluation phase, which examines the extent to which learning objectives have been achieved and assesses the effectiveness of the deployment in relation to organizational goals [10].

The ADDIE model was selected as the theoretical framework for this study because it provides a structured approach for examining Learning and Development processes across their entire lifecycle. Its systematic nature makes it particularly suitable for analyzing the potential impact of emerging technologies on instructional design and training delivery [11].

## 2.3 Ethical and Operational Considerations

Despite the numerous benefits of AI in L&D, its implementation raises important ethical concerns that must be addressed to ensure training quality, fairness, and organizational trust. Generative AI systems are susceptible to producing inaccurate information, commonly referred to as hallucinations, while being biased based on the data on which they have been trained. Consequently, AI-generated content should not be accepted without reviewing. L&D professionals have a responsibility to critically evaluate AI outputs, verify factual accuracy, and identify potential sources of bias in order to support equity, inclusion, and high-quality learning experiences.

The responsible adoption of AI also requires compliance with legal and ethical standards. To mitigate risks related to copyright, data governance, and the evolving regulatory landscape, L&D teams should collaborate closely with legal, compliance, and business stakeholders. As a result, the effective implementation of AI-powered learning solutions depends not only on technology but also on cross-functional cooperation and responsible governance practices [12, 13].

## 3. Solution of the Examined Problem

### 3.1 Research Approach

This paper combines a literature review with qualitative insights obtained through three expert interviews with learning professionals working for the same multinational organization. The participants included a Learning Technology Administrator, a Learning and Development Specialist, and a Senior L&D Specialist.

The interviews focused on current AI-supported learning systems, content creation processes, learning platforms, and future expectations regarding AI integration.

### 3.2 Findings from Industry Practice

The interviews revealed that AI significantly reduces content production time. Processes that previously required several days can now be completed within hours through AI-assisted tools.

Particularly valuable applications include: video generation platforms such as Synthesia and Steve.AI; AI-supported course authoring systems such as SANA; automated multilingual content adaptation; reporting and analytics automation; interactive simulations and role-play environments such as EdApp.

The interviews further revealed that the adoption of AI solutions within the organization is largely driven by immediate operational needs rather than by a unified strategic framework. Learning technologies and AI-powered tools are typically selected on a case-by-case basis to address specific requirements, suggesting that the organization has not yet established a comprehensive strategy for the integration and governance of AI within Learning and Development.

The interviews also highlighted a distinction between older enterprise learning platforms and emerging AI-native solutions. Large organizations often face challenges migrating to newer systems because of extensive integrations, security requirements, and large content repositories.

### 3.3 Emerging AI-Native Learning Models

AI-native learning platforms offer a range of innovative capabilities that significantly enhance the learning experience. These systems can generate courses through natural-language prompts, automatically create quizzes and assessments, analyze learner progress, and provide context-aware recommendations based on individual learning needs. Furthermore, they support personalized learning pathways and interactive role-play simulations that enable learners to apply knowledge in realistic scenarios. Unlike traditional learning platforms, AI-native systems incorporate artificial intelligence into their core architecture, allowing for greater flexibility, automation, and responsiveness to learner behavior and organizational requirements.

Despite these advantages, one of the most notable findings from the interviews was that organizations are often reluctant to transition to AI-native learning ecosystems. Large enterprises have typically invested substantial financial, technological, and human resources in the development of existing LMS and LXP infrastructures, resulting in extensive content repositories, system integrations, and established learning processes. Consequently, migrating to a new AI-native platform may involve considerable costs, security and compliance considerations, and the allocation of significant organizational resources.

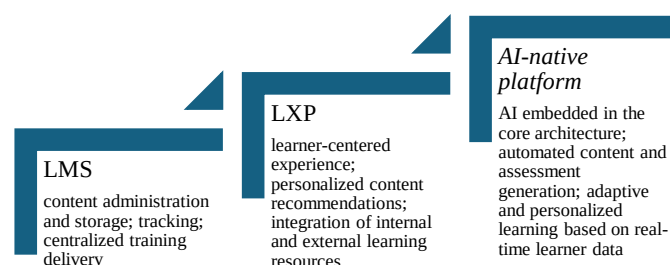


Fig. 2. Evolution of Corporate Learning Platforms

While Figure 2 illustrates the evolution of learning platform architectures and functionalities, it does not imply that organizations necessarily follow this trajectory or replace existing systems.

## 4. Results and Discussion

The findings indicate that AI provides three major advantages within corporate learning environments:

- First, AI improves efficiency. Content development, translation, reporting, and administration can be significantly accelerated through automation.
- Second, AI supports personalization. Rather than delivering identical learning experiences to all employees, AI systems analyze learner behavior and recommend tailored training pathways.
- Third, AI improves scalability. Large organizations operating across multiple countries can deploy learning materials in various languages with significantly reduced effort.

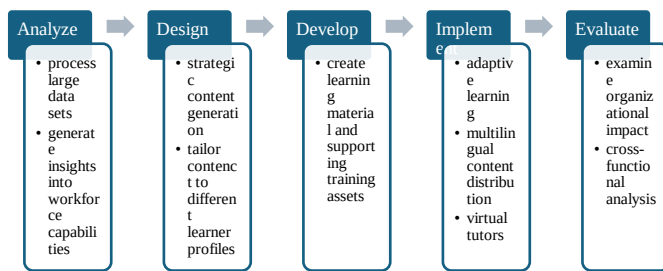
However, several limitations remain. From the literature review and the interviews it is evident that most of the advantages are concentrated in the Development and Implementations phase of the ADDIE instructional framework.

The Development phase involves the creation of learning materials and training resources. This is currently the most common

area of AI application in corporate learning environments, where AI-powered tools support the generation of training content, translations, quizzes, simulations, and multimedia learning assets. The Implementation phase concerns the delivery of learning experiences to employees.

Although AI technologies are also capable of supporting the Analysis and Evaluation phases through learner analytics, automated assessments, and real-time reporting, these capabilities are often applied at an operational rather than a strategic level. The findings suggest that many organizations use AI to measure learner activity and training completion rates, but less frequently to identify workforce capability gaps, forecast future skill requirements, or evaluate the broader organizational impact of learning interventions.

The ADDIE framework suggests a more comprehensive approach to AI integration. In the Analysis phase, AI can support L&D professionals by processing large datasets, identifying emerging skills needs, and generating insights into workforce capabilities. Similarly, the Evaluation phase should extend beyond individual learner progress and assess learning outcomes at an organizational level, including performance improvement, business impact, and return on investment. Figure 3 presents a proposed framework illustrating how AI-supported activities can be integrated across all stages of the ADDIE model to encourage a more balanced and effective implementation.



**Fig. 3.** AI Applications Across ADDIE Framework

While AI presents significant opportunities across the ADDIE framework, its integration also introduces ethical considerations that must be addressed throughout the instructional design process. During the Analysis phase, the use of AI for workforce analytics and skills mapping raises concerns regarding data privacy, consent, and the potential for bias in underlying datasets. In the Design phase, L&D professionals must ensure that AI-supported recommendations and learning pathways are inclusive and do not reinforce existing inequalities among learners. During Development, particular attention should be paid to the quality and accuracy of AI-generated content. The Implementation phase introduces additional challenges related to transparency and learner trust. Finally, in the Evaluation phase, organizations should ensure that AI-generated analytics are interpreted critically and that learning effectiveness is assessed using meaningful business and performance indicators rather than relying solely on platform-generated metrics.

Consequently, the successful adoption of AI within the ADDIE model requires continuous human oversight, validation, and cross-functional collaboration.

## 5. Conclusion

Artificial Intelligence has the potential to transform Learning and Development from a largely administrative function into a strategic capability that supports workforce adaptability and organizational competitiveness.

The current findings indicate that implementations focus predominantly on operational efficiency and content creation. Nevertheless, the greatest future value may emerge from AI-supported personalization, skills intelligence, adaptive learning pathways, learner analytics, and strategic workforce planning.

While new AI-based learning platforms offer advanced capabilities and greater flexibility than traditional LMS and LXP systems, organizations are often reluctant to migrate to them. Large enterprises typically maintain extensive learning ecosystems containing substantial content repositories, customized integrations, and established security and compliance mechanisms. This challenge warrants further investigation.

To maximize the benefits of AI in Learning and Development, organizations should establish responsible AI governance practices, invest in employee upskilling, implement clear evaluation frameworks, and maintain human oversight throughout the all phases of the learning lifecycle.

Future research should investigate the long-term impact of AI-supported learning interventions on skill acquisition, employee performance, engagement, and organizational outcomes.

## References

1. Rudy B C., *Evaluating ROI on Your Company's Learning and Development Initiatives*, HBR (2023)
2. Lamson M, *The Role of AI in Learning and Development. Make Way for Artificial Intelligence in Learning and Development*, It's Here, Inc. (2018)
3. Vidor A, *AI in Learning and Development (2026)*, Synthesia.io (2026)
4. Synthesia, *AI in Learning & Development Report 2026 | Synthesia*, Synthesia.io (2026)
5. Webanywhere, *Navigating the Shift from LMS to LXP: The Learning Revolution* Webanywhere (2024)
6. Clark D, *Learning Technology*, Kogan Page Ltd., p. 163-167 (2023)
7. Masero R, *Learning Management Systems To Learning Experience Platforms: When Does An LMS Become An LXP?*, eLearning Industry (2023)
8. Krishna D, *19 Cutting-Edge AI tools for l&d professionals in 2023*, Animaker (2023)
9. Loomis, Ph.D. A, Batra N, Cui K, Kurtzman W, Fleming M, Kmetz K, Kalvar S, Smith, PhD G, Latshaw B, Escherich M, Goransson L, O'Rourke B, Shrivastava A, Spasova G, Reinemann L, Heys M and Chertok Z, *IDC FutureScape: Worldwide Future of Work 2026 Predictions*, IDC (2026)
10. Kurt D S, *ADDIE Model: Instructional Design*, Educational Technology (2017)
11. Vogia N, *The evolution of eLearning with AI strategist*, Stella Lee, Keep it Simple (2024)
12. Floridi L, *The ethics of information*, OUP, p. 3-18 (2013)
13. Gambelin O, *Responsible AI*, Kogan Page, p. 3-17 (2024)

# ПОВИШАВАНЕТО НА КВАЛИФИКАЦИЯТА НА ПЕДАГОГИЧЕСКИТЕ СПЕЦИАЛИСТИ И ЕФЕКТЪТ Ѐ ВЪРХУ УПРАВЛЕНИЕТО НА ПРОМЕНЕТЕ В УЧИЛИЩЕТО

## CONTINUING PROFESSIONAL DEVELOPMENT OF PEDAGOGICAL SPECIALISTS AND ITS EFFECT ON THE MANAGEMENT OF CHANGE IN SCHOOL

Николина Димитрова Чушева, доц. д-р Мирослав Кирилов Терзийски  
Югозападен университет „Неофит Рилски“, България  
n\_chusheva@abv.bg, miroslav.t@swu.bg

Nikolina Dimitrova Chusheva, Assoc. Prof. Dr. Miroslav Kirilov Terziyski  
South-West University “Neofit Rilski”, Bulgaria  
n\_chusheva@abv.bg, miroslav.t@swu.bg

**Abstract:** The article examines the relationship between the continuing professional development (CPD) of pedagogical specialists and the capacity of schools to manage change. It analyses the Bulgarian regulatory framework, which institutionalises CPD through a system of qualification credits, and applies the concept of professional capital as a theoretical lens. A secondary analysis of OECD TALIS 2024 data for Bulgaria shows that CPD has a tangible positive effect on teaching and that schools operate in a relatively favourable environment for change. The study concludes that CPD becomes a real lever for change management when it is planned as a collective, school-based learning process rather than an accumulation of individual credits.

**Keywords:** CONTINUING PROFESSIONAL DEVELOPMENT, PEDAGOGICAL SPECIALISTS, CHANGE MANAGEMENT, PROFESSIONAL CAPITAL, SCHOOL LEADERSHIP, TALIS 2024, BULGARIA

### 1. Увод

Българското училище от близо едно десетилетие функционира в среда на непрекъсната и многопластова промяна. Законът за предучилищното и училищното образование (ЗПУО) [2] поставя началото на цялостна реформа, налагаща реализирането на актуални, важни за днешния ден промени, имащи стратегическо значение за развитието на българското училище. Въвеждането на компетентностен подход, държавни образователни стандарти, приобщаващо образование, нови учебни програми и ускорена цифровизация на учебния процес изисква знания и умения за ефективно реализиране на тези промени. Успехът на промените не зависи единствено от качеството на нормативните актове, а преди всичко от капацитета на педагогическите специалисти – до колко и как те ще ги осмислят, приемат и реализират в ежедневната си практика.

В този контекст продължаващата квалификация на учителите и директорите се превръща от формално изискване в стратегически инструмент за управление на промяната. С Наредба № 15 от 22 юли 2019 г. за статута и професионалното развитие на учителите, директорите и другите педагогически специалисти [1] се институционализира тяхното непрекъснатото професионално учене чрез система от квалификационни кредити, обвързана с атестирането и кариерното им развитие.

Въпреки нарасналото внимание към необходимостта от непрекъснато повишаване на квалификацията на педагогическите специалисти, връзката между нея и способността на училището да управлява промените остава недостатъчно изследвана и систематизирана в българския контекст.

Затова проучването на този проблем е актуално, необходимо и значимо за ефективно осъществяване на процеса на реализирането на по-малки или по-големи промени в училищната институция. С други думи да се установи повишаването на квалификацията на педагогическите специалисти влияе ли и до колко влияе върху готовността на учителите и на училището като организация да управляват промяната. За постигането на тази цел са поставени следните задачи: да се анализира нормативната рамка на продължаващата квалификация; да се представи теоретичен модел, свързващ квалификацията с управлението на промяната; да се направи вторичен анализ на емпирични данни от

международното изследване OECD TALIS 2024 [3] за ефекта на квалификацията върху практиката и участието на учителите в управлението на училището.

### 2. Предпоставки и нормативна рамка на квалификацията на педагогическите специалисти

#### 2.1. Нормативна уредба

Проблемът за повишаване на квалификацията на педагогическите специалисти у нас се разглежда в няколко нормативни документа. В Раздел III на ЗПУО [2] се посочва, че квалификацията е задължителен и непрекъснат процес, който се осъществява чрез обучения, организирани от висши училища, научни организации, специализирани обслужващи звена и обучителни организации с *одобри програми*. Законодателят основателно акцентира върху значимостта на одобрени програми за обучение. Това не позволява осъществяването на квалификационна дейност на основата на собствено виждане за съдържанието на квалификационната програма от лица и организации, имащи интерес да реализират квалификационни курсове. Процедурата по одобрение възпира появата на некоректни обучители, които предлагат формални или повърхностни курсове без реална стойност за учителите.

Спазването на законовите разпоредби предполагат високо качество на осъществяваната квалификационна дейност и дава възможност за използването на академичен и експертен капацитет - доказани преподаватели, учени и методици, които познават съвременните тенденции в педагогиката, психологията и съответните научни дисциплини. Осигуряват използването на иновативни методи, доказали ефективността си практики, а не непроверени теории. Одобрените от МОН програми гарантират, че съдържанието на курса отговаря на националните приоритети, нормативната уредба и потребностите на съвременната училищна система. Те осигуряват легитимност и трудово-правно признаване - *квалификационни кредити*.

Само обучения, проведени от институции съгласно чл. 222 от ЗПУО и с вписани в Регистъра на МОН програми, носят на учителите квалификационни кредити. Тези кредити са задължително условие за атестирането на педагозите, за придобиване на квалификационни степени и за тяхното кариерно израстване. В този контекст е важно квалификацията



да не се разглежда само като сбор от индивидуални обучения и натрупани кредити, а като колективен процес, който изгражда организационен капацитет за промяна.

Регламентирането на обученията гарантира, че инвестираните от държавата, училището и учителя време и ресурси водят до **реално повишаване на качеството на образованието**, а не просто до издаване на документ.

Конкретните условия и ред за организиране, провеждане и отчитане на квалификационната дейност са детайлизирани в Наредба № 15 от 22.07.2019 г. за статута и професионалното развитие на учителите, директорите и другите педагогически специалисти [1], която определя видовете квалификация, системата на квалификационните кредити и механизмите за професионално развитие.

Съгласно Наредбата продължаващата квалификация е задължителен елемент от професионалното развитие на всеки педагогически специалист. Тя се измерва чрез квалификационни кредити, като един кредит съответства на 16 академични часа, от които не по-малко от 8 са присъствени. Предвижда се участие в обучения с продължителност не по-малко от 16 академични часа годишно за всеки специалист, а за всеки атестационен период от четири години – не по-малко от три квалификационни кредита, или общо 48 академични часа. Увоените кредити се удостоверяват с документ за допълнителна квалификация и се отчитат при атестирането и при изграждането в кариерните степени. Основните изисквания са обобщени в Таблица 1.

Таблица 1. Изисквания за продължаваща квалификация съгласно Наредба № 15/2019 г.

| Показател                   | Изискване                             |
|-----------------------------|---------------------------------------|
| Един квалификационен кредит | 16 ак. часа (≥ 8 присъствени)         |
| Годишен минимум             | ≥ 16 ак. часа                         |
| Атестационен период (4 г.)  | ≥ 3 кредита (48 ак. часа)             |
| Удостоверяване              | Документ за допълнителна квалификация |

Така изградената кредитна система обвързва индивидуалното учене с формалното признаване на професионалното развитие. Същевременно тя създава предпоставки квалификацията да бъде планирана не само на индивидуално, но и на училищно равнище – като част от политиката на институцията за развитие на човешките ресурси.

## 2.2. Теоретична рамка

Теоретичната основа на анализа е концепцията за професионалния капитал на Харгрийвз и Фулан [4]. Според авторите качеството на преподаването и капацитетът за промяна се определят от три взаимосвързани компонента: човешки капитал (знанията и уменията на отделния учител), социален капитал (качеството на професионалните взаимодействия и сътрудничеството в колектива) и достатъчен капитал за вземане на решения (способност за вземане на професионални решения, натрупан чрез опит и рефлексия). От тази гледна точка квалификацията поражда устойчив ефект само когато развива и трите вида капитал, а не единствено индивидуалните компетентности.

Управлението на промяната в училището се разглежда през призмата на модела на Фулан за лидерство в култура на промяна [6]. С други думи акцент се поставя върху способността да се изгради среда, в която адаптивността, експериментирането и непрекъснатото учене се превърнат в естествено състояние на екипа или организацията. Фулан подчертава ролята на споделеното лидерство, на изграждането на взаимоотношения и на необходимостта от непрекъснатото учене за ефективното управление на промяната. Допълваща

рамка е осемстепенният модел на Котър за провеждане на промяна [7], описващ последователни етапи – от създаване на усещане за неотложност и формиране на водещ екип до закрепване на промяната в организационната култура. Професионалното развитие на хората се разглежда не като следствие, а като движеща сила на успешната промяна.

Теоретичните модели представени от Харгрийвз, Фулан и Котър се допълват взаимно, като в единия фокусът се поставя върху значимостта на професионалния капитал за развитие на училището, а в другия върху лидерските и организационните механизми, чрез които този капитал се превръща в устойчиви промени в училищната практика. Ефективната квалификация следва да развива едновременно човешкия, социалния и професионалния капитал за вземане на решения, тъй като само балансираното развитие на тези три компонента създава реален капацитет за въвеждане и поддържане на организационни промени.

Лидерството има ключова роля за успешното реализиране на промяната, като задачата на училищния ръководител е не само да инициира промени, но и да създаде условия за активно участие на педагогическия екип в този процес.

## 3. Методология

На основата на анализа на действащата нормативна уредба и анализ на публикувани агрегирани данни от международно изследване на преподаването и ученето на ОИСР (OECD TALIS 2024) [3] за България, се отчита ефектът на квалификацията върху преподаването и върху участието на учителите в управлението на училището особено в условията на провеждането на промяна. В този контекст са използвани официално оповестените стойности за България и съответните средни стойности за държавите от ОИСР, както и относителното класиране на страната спрямо останалите участници. Анализът е съсредоточен върху показатели, които позволяват да се направят изводи относно значимостта на квалификационна дейност върху процеса на преподаване, така и върху повишаване на активността на педагогическите специалисти в процеса на провеждане на промени в училищната институция.

## 4. Резултати и дискусия

Данните от OECD TALIS 2024 [3] показват, че продължаващата квалификация има осезаемо положително въздействие върху практиката на българските учители. По-голямата част от тях – около 58% – отчитат, че участието им в квалификационни дейности е оказало положителен ефект върху ефективността на преподаването. Тези данни са близки до средната стойност за държавите от ОИСР (около 55%), което е добър атестат за реализираната у нас продължаваща квалификация на педагогическите специалисти. Избраните показатели за направения анализ са представени в Таблица 2.

Таблица 2. Избрани показатели от OECD TALIS 2024 за България.

| Показател (TALIS 2024)                                  | България | ОИСР | №  |
|---------------------------------------------------------|----------|------|----|
| Положителен ефект на квалификацията върху преподаването | 58%      | 55%  | –  |
| Учителите се ценят в обществото                         | 42%      | 22%  | –  |
| Активно участие в решенията на училището                | 91,9%    | н/п  | 4  |
| Обратна връзка от външни органи                         | 90,7%    | н/п  | 2  |
| Промени без осигурени ресурси                           | 11,3%    | н/п  | 55 |
| Удовлетвореност от работата                             | 96,5%    | н/п  | 5  |

№ – място на България сред 55 участващи системи; н/п – няма съпоставима средна стойност.

Особено показателни са данните за позицията на учителската професия и за участието на учителите в управлението. Делът на българските учители, които смятат, че професията се цени в обществото, достига около 42% – стойност, близо двойно по-висока от средната за ОИСР (около 22%) и значително нараснала спрямо предходния цикъл на изследването. Този резултат е изключително важен за настоящото изследване, тъй като общественото признание е сред факторите, които подкрепят мотивацията за професионално развитие и за участие в промени.

По отношение на управлението на училището България се нарежда сред водещите държави. Около 91,9% от учителите съобщават, че участват активно във вземането на решения в училището, а около 90,7% получават редовна обратна връзка от външни органи – стойности, които поставят страната съответно на едно от първите места сред 55-те участващи системи. Същевременно едва около 11,3% от учителите посочват, че от тях се изисква да въвеждат промени, без да са осигурени необходимите ресурси – най-ниската стойност сред всички участници. Високата удовлетвореност от работата (около 96,5%) допълва тази картина на относително благоприятна среда за провеждане на промени.

Разгледани съвместно, тези резултати подкрепят основната теза на изследването. Положителният ефект на квалификацията върху преподаването, съчетан с високо равнище на участие в управлението и с осигуреност на ресурсите за промяна, показва, че квалификацията функционира не изолирано, а като част от организационния капацитет на училището. Когато професионалното учене се планира колективно и е свързано с реалните приоритети на институцията, то изгражда едновременно човешкия, социалния и потенциала за вземане на решения [4] и така подготвя почвата за устойчиво управление на промените. Обратно, ако квалификацията се свежда до индивидуално натрупване на кредити без връзка с училищните политики, нейният ефект върху способността за промяна остава ограничен.

Следва да се отбележи, че използваните данни са самооценъчни и агрегирани на национално равнище, поради което не позволяват каузални изводи на ниво отделно училище. Те обаче очертават ясна и съгласувана с теорията картина, която може да бъде основа за по-нататъшни емпирични изследвания в българския контекст.

## 5. Заключение

Анализът показва, че продължаващата квалификация на педагогическите специалисти е важна предпоставка за успешното управление на промените в училището. Нормативната рамка [1], [2] институционализира непрекъснатото професионално учене чрез системата от квалификационни кредити и го обвързва с атестирането и кариерното развитие. Емпиричните данни от OECD TALIS 2024 [3] потвърждават, че в България квалификацията има осезаем положителен ефект върху преподаването и че училищата функционират в относително благоприятна среда за промяна – с високо участие на учителите в решенията и с добра осигуреност на ресурсите.

Основният извод е, че ефектът на квалификацията върху управлението на промените е най-силен тогава, когато тя се планира като колективен, училищно базиран процес на учене, а не като сбор от индивидуални кредити. Това насочва към няколко практически препоръки: квалификацията да се обвързва стратегически с приоритетите за развитие на конкретното училище; да се насърчават формите на сътрудничество и наставничество, които изграждат социален капитал; да се развива споделяно лидерство, което превръща професионалното учене в реален инструмент за управление на промяната [6], [7].

## Литература

- [1] Наредба № 15 от 22.07.2019 г. за статута и професионалното развитие на учителите, директорите и другите педагогически специалисти. Обн. ДВ, бр. 61 от 2.08.2019 г.
- [2] Закон за предучилищното и училищното образование. Обн. ДВ, бр. 79 от 13.10.2015 г.
- [3] OECD. TALIS 2024 Results (Volume I). Paris, OECD Publishing, 2025.
- [4] Hargreaves, A., M. Fullan. Professional Capital: Transforming Teaching in Every School. New York, Teachers College Press, 2012.
- [5] Fullan, M. The New Meaning of Educational Change. 4th ed. New York, Teachers College Press, 2007.
- [6] Fullan, M. Leading in a Culture of Change. San Francisco, Jossey-Bass, 2001.
- [7] Kotter, J. P. Leading Change. Boston, Harvard Business School Press, 1996.

# МЕТОДИЧЕСКИ АСПЕКТИ НА ПРИЛОЖЕНИЕТО НА ГЕНЕРАТИВНИЯ ИЗКУСТВЕН ИНТЕЛЕКТ ПРИ РАЗРАБОТВАНЕТО НА ИЗПИТНИ ТЕСТОВЕ ПО СГРАДОСТРОИТЕЛСТВО

## METHODOLOGICAL ASPECTS OF APPLYING GENERATIVE ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN THE DEVELOPMENT OF EXAMINATION TESTS IN BUILDING CONSTRUCTION

Assoc. Prof. Dr. Arch. Ilieva Y.

The University of Structural Engineering and Architecture "Lyuben Karavelov" – Sofia, Bulgaria  
july\_ilieva@abv.bg

**Abstract:** This scientific paper examines the methodological aspects of applying generative artificial intelligence in the development of examination tests in Building Construction. The capabilities of contemporary generative models to create test items of varying levels of complexity, formulate plausible distractors, and generate diverse question formats are analyzed. Particular attention is paid to content verification and alignment with the defined learning objectives and competency requirements. A sample algorithm for test development using artificial intelligence is presented, incorporating a mandatory independent expert evaluation by the lecturer and subsequent refinement of the items to enhance their variability and quality. The analysis concludes that generative artificial intelligence is an effective tool in supporting teaching activities in the development of high-quality and reliable examination materials, provided that it is applied in strict compliance with pedagogical principles and the professional requirements of the educational process.

**Keywords:** TEACHING METHODOLOGY, ASSESSMENT, EXAMINATION TESTS, GENERATIVE ARTIFICIAL INTELLIGENCE, BUILDING CONSTRUCTION, ARCHITECTURE

### 1. Въведение

Периодът 1950–1970 г. бележи формирането на изкуствения интелект като научно направление, характеризиращо се с разработването на първите теоретични модели, алгоритми за търсене и логическо разсъждение и програмни системи, поставили основите на последващото развитие на областта [1].

През 1950 г. Алан Тюринг публикува труда „Изчислителни машини и разум“, в който поставя фундаменталния въпрос дали машините могат да мислят и предлага Теста на Тюринг като критерий за оценка на способността на машините да проявяват интелигентно поведение [2]. Според Russell и Norvig началото на изкуствения интелект като самостоятелна научна област се поставя с конференцията в Дартмът през 1956 г., на която Джон Маккарти въвежда термина „изкуствен интелект“ (Artificial Intelligence) [3].

Периодът на символния изкуствен интелект (1970-те – 1990-те г.) се характеризира с развитието на експертните системи, известни още като системи, базирани на знания, които представят експертни знания в компютърна форма чрез формализирани правила и логически зависимости с цел подпомагане на процесите на вземане на решения при решаването на специализирани инженерни и приложни задачи. Основни програмни езици за тяхната реализация са Lisp и Prolog. Сред значимите разработки през този период са експертната система MYCIN за медицинска диагностика, системата SHRDLU за обработка на естествен език и алгоритъмът ID3 за автоматично генериране на дървета на решенията [1].

Идеите за използване на експертни системи постепенно намират отражение и в българската научна литература, където са представени разработки, насочени към подпомагане на процесите на проектиране и вземане на решения в строителството. Гороломов и Любенов разработват експертни системи, базирани на програмната среда CLIPS и интегрирани с Delphi, предназначени за подпомагане на различни задачи в строителното проектиране [4, 5]. Първата система подпомага избора на мостови конструкции чрез оценка на икономическата им целесъобразност и сравнение на алтернативни решения [4], а последваща разработка представя експертна система за автоматизирано конструиране на прости стоманобетонни греди, работещи на огъване, прилагайки автономно правилата за конструиране на надлъжната и напречната армировка [5].

Любенов и Якова посочват, че генетичните алгоритми (Genetic Algorithms, GA) и оптимизацията чрез роя от частици (Particle Swarm Optimization, PSO) са сред съвременните методи за оптимизация, намиращи широко приложение при решаването на сложни инженерни задачи [6].

Особен интерес за архитектите и строителните инженери представляват разработките, свързани с интегрирането на специализирани програмни среди с CAD системите за разширяване на функционалността им и автоматизиране на инженерни задачи. Любенов и Малчева-Якова разглеждат съвместното използване на AutoCAD и Delphi, като отбелязват възможностите за повишаване на ефективността на инженерното проектиране чрез външни програмни средства [7]. Подобни аспекти са изследвани и от Любенов, Малчева-Якова и Велинов при използването на програмни инструменти в средата на AutoCAD [8]. В областта на архитектурния дизайн Михайлов, Любенов и Михайлов разглеждат приложението на компютърните технологии и фракталната геометрия за генериране на сложни форми чрез системи от итеративни функции (IFS) [9].

Периодът на машинното и дълбокото обучение (от 1990-те години до началото на 2020-те) се характеризира с развитието на алгоритми, способни да извличат знания от данни и да решават сложни задачи в области като медицина, роботика, бизнес анализи и системи за препоръчване [1].

Както Alalqa отбелязва, през 2023–2024 г. развитието на системите с изкуствен интелект доведе до съществен напредък в тяхната производителност и функционалност, поставяйки началото на нов етап – генеративния изкуствен интелект (Generative AI – GenAI) [10]. Този процес се ускори с развитието на големите езикови модели (Large Language Models – LLMs), способни да обработват и генерират естествен език [11], както и с появата на чат-базирани интерфейси като ChatGPT, Claude и Gemini за създаване и обработка на текстова информация. Наред с тях, специализирани инструменти за работа с документи, като NotebookLM, разширяват възможностите за структуриране, обобщаване и анализ на академични източници.

Според Концепцията за развитието на изкуствения интелект в България до 2030 г. [12], системите с изкуствен интелект са „проектирани от хората“, за да възприемат средата чрез събиране на данни и да подпомагат вземането на решения за постигане на определени цели. Документът определя образованието като приоритетна област за приложение на ИИ, с акцент върху персонализираното обучение, автоматизираното оценяване и генерирането на тестови въпроси, като подчертава

необходимостта от надеждна правна и етична рамка при развитието на тези технологии [12].

В по-ранен етап Малчева-Якова и Любенов разглеждат дистанционното обучение като съчетание на традиционни и индивидуализирани методи с възможностите на компютърните и телекомуникационните технологии, което поставя основа за развитието на съвременните интелигентни образователни системи [13].

В приложен аспект Стефанова посочва, че използването на изкуствения интелект в обучението по геодезия подпомага персонализирането на учебния процес, визуализацията на пространствени данни и автоматизираното оценяване [14]. В сходна посока Димитранов и Димитров представят учебно-базираното приложение QuestionForge, което използва изкуствен интелект за структурирано и контролирано генериране на тестови въпроси от учебно съдържание [15].

Особено значение за съвременното архитектурно и строително проектиране има съчетаването на експертна база от знания с подходяща методология за работа с изкуствен интелект. В този аспект изданието „Актуални архитектурно-конструктивни решения на аграрни сгради“ [16] и „Ръководство за изчисляване на бетонни и стоманобетонни конструкции“ [17], както и други източници, могат да се използват като основа за подпомагане на проектирането, конструктивния анализ и инженерните изчисления чрез възможностите на ИИ.

## **2. Методически модел за разработване на изпитни тестове с помощта на GenAI**

Според Бишков тестът като измерително средство представлява система от стимули, задачи и въпроси, прилагани при предварително определени условия за получаване на резултати, характеризирани изследвания признак [18]. Банков определя тестовото оценяване като сравнително нова дейност и практика в българското образование, която започва да навлиза по-масово у нас с настъпването на XXI век [19]. В този контекст учебно-базираните тестове представляват съвременна форма на тестово оценяване, при която тестовите въпроси се представят и решават чрез интернет среда.

### **2.1. Концептуална рамка на модела**

Предложеният методически модел разглежда GenAI като средство за подпомагане на разработването на изпитни тестове, без да замества методическата и професионалната компетентност на преподавателя. Възможностите на генеративните модели за бързо създаване и разнообразяване на тестово съдържание се съчетават с водещата роля на преподавателя, който осъществява експертен контрол върху неговата съдържателна валидност, дидактическа коректност и професионална релевантност.

### **2.2. Етапи на прилагане на методическия модел**

#### **Етап 1. Определяне на тестовите спецификации**

- определяне на образователното равнище, учебния контекст и специализираната област;
- определяне на учебните цели и оценяваните знания, умения и компетентности;
- определяне на учебното съдържание и тематичния обхват;
- определяне на когнитивните равнища съгласно таксономията на Блум – знание, разбиране, приложение, анализ, синтез и оценка [18];
- определяне на типовете тестови задачи – с избираем или свободен отговор, за скициране и

графично възпроизвеждане, за съпоставяне и определяне на технологична последователност, с изображения и архитектурни чертежи, изчислителни и др.;

- определяне на броя и относителната тежест на задачите по отделните теми и когнитивни равнища.

Резултатът от етапа включва текстови спецификации, съдържащи структурирани входни параметри към GenAI, които служат като основа за генериране на тестови задачи в следващия етап на модела.

#### **Етап 2. Подготовка на входните параметри за GenAI**

- структуриране на информацията от тестовите спецификации като входни параметри за GenAI;
- предоставяне на съдържателна база – учебни материали (лекции, нормативни документи, технически спецификации и методически указания) като надежден източник за генериране на тестовите задачи;
- формулиране на задание (промпт) за генериране на тестовите задачи, включващо изисквания към ключа за отговори и системата за оценяване.

#### **Етап 3. Генериране на тестови задачи и критерии за оценяване чрез GenAI**

- генериране на тестови задачи и варианти за отговор в съответствие с определените спецификации;
- генериране на ключ за правилните отговори и съответстваща система за точкуване и критерии за оценяване;
- структуриране на генерираните тестови материали в единен тестов формат.

#### **Етап 4. Експертна оценка и оптимизиране на генерираните тестови задачи**

- проверка на фактическата коректност на генерираните задачи спрямо действащата нормативна уредба, техническите изисквания и специализираната база в областта на сградостроителството;
- оценка на дидактическата съобразност – еднозначност на формулировките, съответствие с учебните цели и адекватност на дистракторите спрямо типични грешки и затруднения на обучаемите;
- прецизиране на терминологията и осигуряване на съответствие със специфичната професионална лексика на българската строителна практика;
- идентифициране и отстраняване на неясни или недостатъчно обосновани твърдения и други установени неточности;
- проверка на съответствието между тестовите задачи, ключа за отговори и критериите за оценяване;
- коригиране на системата за точкуване, скалата за оценяване и нивата на постижения.

За систематизиране на експертната преценка се препоръчва използването на контролен лист, основан на предварително определени критерии за качество на тестовите задачи. Въз основа на резултатите всяка задача се приема, редактира или отхвърля. Задачите, които не отговарят на определените

критерии, се преформулират, при необходимост с помощта на GenAI, или се изключват от банката с тестови задачи.

#### **Етап 5. Финализиране и валидиране на изпитния тест**

- структуриране на окончателния вариант на теста в съответствие с определените тестови спецификации;
- балансиране на тестовите задачи по тематичен обхват, когнитивно равнище и степен на трудност;
- определяне на окончателната система за оценяване, включително ключ за отговори, точкуване и скала за оценяване;
- проверка на съответствието между целите на оценяването, съдържанието на теста и критериите за оценяване;
- подготовка за прилагане на теста и последващ анализ на резултатите от тестовото оценяване.

Резултатът от етапа е окончателно структуриран и валидиран изпитен тест, готов за прилагане в учебния процес. Така моделът представя цялостен процес: планиране → подготовка на входните параметри → генериране → експертна оценка и оптимизиране → финализиране и валидиране. Последователността подчертава подпомагащата роля на GenAI и водещото значение на методическата и професионалната компетентност на преподавателя за качеството на крайния оценъчен инструмент. Данните от практическото приложение могат да се използват за обновяване на банката с тестови задачи, усъвършенстване на промптовете и идентифициране на теми, изискващи по-интензивна експертна намеса.

### **3. Практическо приложение на методическия модел**

Практическото приложение на разработения методически модел е демонстрирано чрез създаването на изпитен тест по дисциплината „Сградостроителство – II част“, предназначен за студенти от ОКС „Магистър“, специалност „Архитектура“, и ОКС „Бакалавър“, специалност „Строителство и архитектура на сгради и съоръжения“. Тестът е насочен към обективно оценяване на придобитите знания, умения и компетентности чрез проверка на способността на студентите да разбират основните принципи на сградостроителството, да демонстрират фундаментални знания и да прилагат терминология, стандарти, класификации и свойства на строителните материали, да разпознават и класифицират конструктивни и ограждащи елементи, да прилагат нормативни и технически изисквания, да анализират строителни решения и взаимовръзките между отделните елементи, както и да оценяват, аргументират и прилагат подходящи технически решения при решаване на практически проблеми.

Тестът обхваща 13 тематични области: стационарни сглобяеми стени, изпълнени чрез послоен монтаж; преместваеми (мобилни) преградни стени; дървени сглобяеми стени; елементи на сградата, свързани със стените; асансьори; скелетни конструкции; стоманобетонни и стоманени скелетни конструкции; подови конструкции; стоманобетонни подови конструкции; балкони, лоджии, еркери и козирки; окачени тавани и стълби.

При разработването на теста са определени когнитивните равнища съгласно таксономията на Блум: знание – 8% (2 задачи), разбиране – 16% (4 задачи), приложение – 32% (8 задачи), анализ – 24% (6 задачи), синтез – 12% (3 задачи) и оценка – 8% (2 задачи), при общо 25 тестови задачи. По-голямата тежест на равнищата приложение, анализ и синтез е съобразена с практическата насоченост на дисциплината и необходимостта от оценяване на способността на студентите да

прилагат знания, да анализират строителни решения и да формулират подходящи технически решения.

С оглед спецификата на сградостроителството тестът включва различни типове задачи: задачи с избираем отговор в класически формат с 3, 4 или 5 алтернативи, от които една е правилна, а останалите са правдоподобни дистрактори; задачи със свободен отговор – кратък или с пояснение и обосновка; задачи за съпоставяне и за определяне на технологична последователност; задачи за разчитане на изображения, архитектурни и конструктивни чертежи; изчислителни задачи за прилагане на теоретични знания; както и задачи за скициране и графично възпроизвеждане на конструктивни възли и детайли.

Броят и относителната тежест на задачите се определят при равнопоставено представяне на всички основни тематични области и включване на разнообразни типове задачи, съобразени със спецификата на учебното съдържание, с цел цялостно и многостранно оценяване на знанията, уменията и компетентностите.

Като част от практическото приложение на методическия модел е разработено задание към генеративния изкуствен интелект, чрез което се задават параметрите за генериране и структуриране на изпитния тест, включително изискванията към тестовите задачи, вариантите за отговор, ключа за правилните отговори и системата за оценяване. Заданието е формулирано по следния начин:

„На основата на предоставените учебни материали и утвърдените спецификации разработи 4 варианта на изпитен тест по дисциплината „Сградостроителство – II част“. Всеки вариант да съдържа еднакъв брой задачи, тематичен обхват, типове задачи и разпределение по когнитивни равнища, като задачите са различни, но с еквивалентна степен на трудност. За всяка задача формулирай ясен, еднозначен и съдържателно коректен въпрос и подходящ формат на отговор. При задачите с избираем отговор включи една правилна алтернатива и правдоподобни дистрактори. Включи задачи със свободен отговор, изчислителни и графични задачи съгласно спецификациите. Генерирай ключ с правилните отговори и система за точкуване с критерии за оценяване на задачите със свободен отговор, изчислителните и графичните задачи. Използвай единствено информацията от предоставените учебни материали, без да въвеждаш допълнителни нормативни изисквания или факти. Провери всеки вариант за съответствие с тематичните и когнитивните спецификации, фактическа и съдържателна коректност, еднозначност и еквивалентност на трудността. Структурирай четирите варианта, ключовете и критериите за оценяване в единен формат. След генерирането представи обобщение на разпределението на задачите по тематични области, типове задачи и когнитивни равнища за всеки вариант.“

Така структурираната информация от тестовите спецификации, съдържателната база – учебните презентации към лекциите, както и формулираното задание (промпт), включващо изискванията към тестовите задачи, ключа за отговори и системата за оценяване, се подават като входни параметри към GenAI. За генерирането на тестовите задачи е използван NotebookLM (Gemini Notebook).

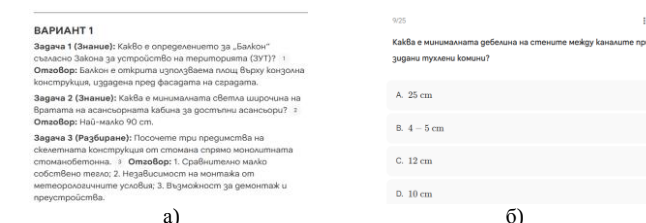
В резултат на еднократното изпълнение на предварително формулираното задание, без последващи корекции или допълнителни инструкции към GenAI, са генерирани четири варианта на изпитния тест с по 25 задачи, съобразени с предварително определените тематични области, типове задачи и когнитивни равнища, с цел оценяване на приложимостта на модела и качеството на първоначално генерирания резултат.

В рамките на практическото приложение на модела са използвани и възможностите на „Студийо – Тест“ в NotebookLM.



#### 4. Анализ на приложимостта и ограниченията на модела

Генерираните изпитни материали показват, че GenAI успява бързо да формира задачи с различни когнитивни равнища и да разпредели съдържанието между основните тематични направления. Генерирани са и различни типове задачи – с кратък отговор, изчислителни, графични, както и задачи за анализ и оценка. Наред с това са налице несъответствия между задачите и посоченото когнитивно равнище. Например някои задачи, определени като „анализ“ или „оценка“, фактически изискват възпроизвеждане на информация или даване на кратък фактологичен отговор. Обратно, част от задачите за приложение са формулирани като обикновено посочване на нормативна стойност, без реално прилагане на знание. Констатирани са и проблеми при формулирането на условията и отговорите, като в отделни случаи отговорите съдържат информация, която не произтича непосредствено от зададения въпрос или от предоставените материали. Налице е необходимост от допълнително прецизиране на тестовия формат, структурата и визуалното представяне на генерирания изпитен материал (фиг. 1а). Констатираните отклонения потвърждават необходимостта от задължителна експертна проверка и оптимизация на генерираните изпитни материали преди тяхното реално приложение.



Фиг. 1 Генерирани тестови въпроси: а) чрез NotebookLM; б) чрез „Студио – Тест“ в NotebookLM.

Апробацията на „Студио – Тест“ в NotebookLM (фиг. 1б) показва, че инструментът позволява бързо генериране на отделни варианти с еквивалентен тематичен обхват и степен на трудност при фиксиран брой задачи. Генерирането е ограничено до задачи с избираем отговор, като към всяка се предоставя подсказка. При отделни въпроси е установено включване на допълнителна, макар и нормативно коректна, информация извън учебното съдържание, което потвърждава необходимостта от експертна проверка. Тестът се представя в интерактивен формат и е подходящ за онлайн провеждане.

#### 5. Заключение

В заключение, практическото приложение на методическия модел потвърждава потенциала на генеративния изкуствен интелект като ефективен инструмент за подпомагане на преподавателя при бързото разработване на качествени и надеждни изпитни материали, като същевременно запазва водещата роля на педагогическата и професионалната експертиза. Предложеният подход може да бъде адаптиран към други дисциплини и образователни контексти при наличие на ясно дефинирани цели, съдържателни източници и критерии за оценяване.

#### 6. Литература

1. Delipetrev, B., C. Tsinaraki, U. Kostić. *Historical Evolution of Artificial Intelligence: Analysis of the Three Main Paradigm Shifts in AI*. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2020. EUR 30221 EN, JRC120469. ISBN 978-92-76-18940-4, DOI: 10.2760/801580
2. Turing, A. Computing Machinery and Intelligence. *Mind*, **LIX**, 433–460 (1950), DOI: 10.1093/mind/LIX.236.433

3. Russell, S., P. Norvig. *Artificial Intelligence: A Modern Approach*. Pearson Education Limited, 2016
4. Гороломов, Н., Л. Любенов. Една експертна система в строителното проектиране. В: *Научна конференция с международно участие ВСУ'2006*. Т. I. София: Висше строително училище „Любен Каравелов“, 2006, с. 193–196
5. Гороломов, Н., Л. Любенов. Експертни системи в строителното проектиране. В: *Научна конференция с международно участие ВСУ'2007*. Т. I. София: Висше строително училище „Любен Каравелов“, 2007, с. 154–157
6. Любенов, Л., Ст. Якова. Съвременни методи за оптимизиране. В: *XI Международна научна конференция с международно участие ВСУ'2011*. Т. I. София: Висше строително училище „Любен Каравелов“, 2011, с. 92–96
7. Любенов, Л., Ст. Малчева-Якова. Относно съвместното използване на AutoCAD и DELPHI. В: *Научна конференция с международно участие ВСУ'2007*. Т. I. София: Висше строително училище „Любен Каравелов“, 2007, с. 149–153
8. Любенов, Л., Ст. Малчева-Якова, Й. Велинов. Особенности при използването на средства за програмиране в среда на AutoCAD. В: *Научна конференция с международно участие ВСУ'2006*. Т. I. София: Висше строително училище „Любен Каравелов“, 2006, с. 154–157
9. Михайлов, Я., Л. Любенов, Б. Михайлов. Компютърни технологии и фрактална геометрия в архитектурният дизайн. В: *XIV Международна научна конференция с международно участие ВСУ'2014*. Т. III. София: Висше строително училище „Любен Каравелов“, 2014, с. 76–80, ISSN 1314-071X
10. Alalqa, A. The History of the Artificial Intelligence Revolution and the Nature of Generative AI Work. *DS Journal of Artificial Intelligence and Robotics*, **2**, 1–15 (2024), DOI: 10.59232/AIR-V2I4P101
11. Bommasani, Rishi et al. *On the Opportunities and Risks of Foundation Models*. Stanford: Stanford Center for Research on Foundation Models, Stanford Institute for Human-Centered Artificial Intelligence, 2021. Available at: <https://arxiv.org/abs/2108.07258>
12. Министерство на транспорта, информационните технологии и съобщенията. *Концепция за развитието на изкуствения интелект в България до 2030 г.: Изкуствен интелект за интелигентен растеж и просперитиращо демократично общество*. Република България (2020)
13. Малчева-Якова, Ст., Л. Любенов. Дистанционното обучение и образование. В: *Научна конференция с международно участие ВСУ'2006*. Т. I. София: Висше строително училище „Любен Каравелов“, 2006, с. 150–153
14. Стефанова, А. Приложение на изкуствения интелект в обучението по геодезия. В: *Трета национална научно-практическа конференция „Дигитална трансформация на образованието – проблеми и решения“*. Русе: Русенски университет „Ангел Кънчев“, 2025, с. 415–419
15. Димитранов, Д., Г. Димитров. Изкуственият интелект като инструмент за автоматизирано създаване на бази данни от тестови въпроси. В: *Четвърта научно-практическа конференция с международно участие „Дигитална трансформация на образованието – проблеми и решения“*. Русе: Русенски университет „Ангел Кънчев“, 2026, с. 576–580
16. Манчева-Велкова Б., С. Цветков. *Актуални архитектурно-конструктивни решения на аграрни сгради*. София: Прорилер, 2017, ISBN 978-954-392-475-2
17. Гуглев, Р., Г. Пеева, С. Петров, М. Пощов, К. Кулинов, С. Йончев, П. Балева-Йосифова, Т. Даалов, Б. Даалов, В. Славчев, З. Петков. *Ръководство за изчисляване на бетонни и стоманобетонни конструкции от обикновен бетон без предварително налягане на арматурата в съответствие с БДС EN 1992-1-1:2004*. София: НИСИ, 2014, ISBN 978-619-90296-1-9
18. Бижков, Г. *Теория и методика на дидактическите тестове*. София: Просвета, 1992
19. Банков, К. *Увод в тестологията*. София: Изкуства, 2012, с. 5

# МУЗИКАЛНО-ИСТОРИЧЕСКИТЕ ЗНАНИЯ, УМЕНИЯ, КОМПЕТЕНТНОСТИ В ПРОЦЕСА НА ПРОФЕСИОНАЛНА ПОДГОТОВКА НА БЪДЕЩИТЕ УЧИТЕЛИ ПО МУЗИКА

## MUSIC HISTORY KNOWLEDGE, SKILLS, AND COMPETENCIES IN THE PROFESSIONAL TRAINING OF PROSPECTIVE MUSIC TEACHERS

д-р Панчева-Георгиева А. Н.  
Шуменски университет „Епископ Константин Преславски“  
Педагогически факултет  
Шумен, България  
[a.pancheva@shu.bg](mailto:a.pancheva@shu.bg)

**Abstract:** The report presents theoretical literature that substantiates the need for knowledge, skills, and competencies in music history for the successful work of a music teacher. Conclusions are drawn based on an analysis of the results of a test designed to assess the level of music-historical knowledge, skills, and competencies among students—future music educators.

**KEYWORDS:** KNOWLEDGE, SKILLS, AND COMPETENCIES IN MUSIC HISTORY; FUTURE MUSIC TEACHERS

### 1. Увод

Съвременната музикално-образователна реалност в съчетание с разностранната дейност на музикалния педагог, която е „динамична, педагогически и психологически тя варира и се променя“ [3, стр. 84], все повече налага преосмисляне на дейността на бъдещите специалисти и на сферата на тяхната компетентност. Комплексният характер на работата на учителя по музика изисква притежаването на знания, умения, компетентности от различни области – базови и специални [7, стр. 69]. Необходимостта от подготовката на компетентни бъдещи специалисти, които са получили „образование с добро качество“ [12] има глобални измерения, ясно заявени и в нормативните документи, свързани с образователната система [14, 15, 16].

### 2. Същност на изследвания проблем

В изследвания, свързани с цялостния профил на бъдещите учители по музика, авторите са единодушни относно съществената роля на знанията, уменията, компетентностите, свързани с областта на история на музикалното изкуство в подготовката на музикалните педагози.

Според Кабалевики учителят по музика е длъжен да „има подготовка в областта на теория и история на музиката“ [6].

Арчажникова акцентира на необходимостта от цяла система от знания, тъй като е „невъзможно компетентно да се обясни художествения образ на произведение без познаване на конкретната историческа епоха, стилистичните особености .... разбиране на специфичния хармоничен език на даден композитор“ [2, стр. 55]. От съществено значение са: „комплекс от специални знания по теми от историко-теоретичния, и др. ... цикли“; „активно използване на исторически и теоретични знания...“ [2, стр. 59-70].

Абдулин и Николаева обръщат внимание на „усвояване на знания за музиката от различни исторически епохи, музикално-исторически стилове, творчеството на композитори от миналото и настоящето, а също така и формиране на умения и навики да се оперира с тези знания в различни видове музикални дейности“ [1, стр. 141]. Освен това като важно посочват владението на: „теоретическите знания в областта на музикалното образование“ [1, стр. 12]; музикално-историческите знания – знания за жанр, стил, творчеството на композиторите, изпълнителите, видовете състави и други [1, стр. 96-97].

В контекста на компетентностния модел на бъдещия учител по музика Рускова посочва като необходими знания *от областта на история на музикалното изкуство и съвременни тенденции в неговото развитие (епохи, стилове, направления, жанрове)* [7, стр. 80-85].

Изследвайки компетентността на бъдещите музикални педагози Гранецкая посочва, че „педагогът-музикант трябва да притежава редица знания, умения и способности от различни области: педагогика, психология, физиология, музикознание, литература, история и други“ [10, стр. 41].

Според Гагим учителят по музика трябва да притежават компетентност в областта на теория и история на музиката „от елементарните форми и жанрове до висшите, да познава стиловете, епохите, националните школи, композиторските творения, историята на музикалните инструменти и др.“ [9, стр. 67].

Де Лука обръща внимание на това, че взаимодействието с музикалното произведение изисква то да се „разгледа в неговия исторически контекст и да се подчертаят връзките му с този контекст...“ [8, стр. 121].

В други колективни изследвания авторите са единодушни, че: музикално-теоретичния аспект от подготовката на студентите „осигурява придобиване на набор от знания и умения, които позволяват съзнателно възприемане музикални явления, овладяване на различни форми на музициране, способност за творческо боравене...“ [11, стр. 232]; за формирането на професионална компетентност на бъдещите учители по музика е необходима музикално-теоретичната, диригентската, хоровата, вокалната и инструменталната подготовка [13, стр. 79].

Представената теоретична литература, както и прегледът и анализът на учебните програми по музика за общообразователна подготовка в българските училища [4], които отразяват нормативните изисквания, разкриват необходимостта от формиране и развитие на музикално-историческа компетентност при подготовката на бъдещите учители по музика. В начална степен на базата на практическа дейност и натрупване на първоначални, фундаментални знания се полагат основи за формиране на музикално-историческа компетентност. В прогимназиален етап чрез надграждане на основата на спираловидния принцип се разширяват знанията, развиват се умения и се създават условия за формиране на музикално-историческа компетентност. Този етап на обучение

се характеризира с присъствието на структурни компоненти на музикално-историческата компетентност:

- епохи;
- закономерности в развитието на музикалното изкуство;
- стилове, стилистични особености;
- направления;
- жанрове и форми, свързани с тях;
- личностни и творчески особености на композитори и творчеството им;
- композиторски школи, представители;
- познаване на произведения от световната музикална култура;
- изпълнители, видове състави;
- способност да се оперира със знанията в различните видове дейност;
- готовност за музикално-просветителска дейност [4, стр. 98-99].

Във връзка с аргументираната необходимост от музикално-историческа компетентност в работата на бъдещите учители по музика е съставен авторски тест с цел да се установи степента на овладяване на знания, умения и компетентности на обучаваните специалисти. Тестът съдържа 33 въпроса, свързани с учебното съдържание в прогимназиален етап на обучение като част от тях са от затворен тип, а други – от отворен тип. Максималният брой точки е сто. Според резултата (броя на получените точки) се разграничават три нива – ниско, средно и високо ниво. Резултатите се интерпретират както следва: 30-49 точки – ниско ниво; 50-79 точки – средно ниво; 80-100 точки високо ниво [5, с. 79].

Изследвани са две групи студенти от специалност „Педагогика на обучението по музика“ при ШУ „Еп. К. Преславски“, обучавали се през академичната 2025-2026 година. Едната група са тези в начален етап на обучение – I курс (14 студенти), а студентите от III и IV курс (24 студенти) представляват групата на завършващите своята професионална подготовка.

От получените резултати при провеждане на теста за установяване степента на овладените музикално-исторически знания, умения, компетентност могат да се направят следните изводи:

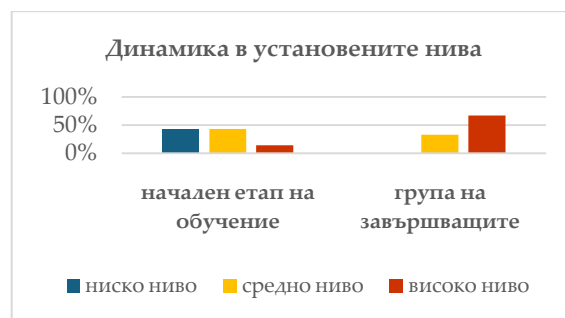
1. От представените данни се вижда, че от всички изследвани студенти най-малък е дялът на тези, с ниско ниво – 21 %. Почти една трета от подготвяните специалисти имат средно ниво – 29 %, а половината от всички изследвани са показали високи резултати – 50 %. Това показва, че по-голямата част от бъдещите учители по музика разбират значението от наличието на музикално-исторически знания, умения, компетентности за успешната си и ефективна работа в бъдеще; имат желание за развитие и усъвършенстване.



Фиг. 1: Процентно разпределение на установените нива във връзка с музикално-историческите знания, умения, компетентности на всички изследвани студенти

2. При съпоставянето на двете групи студенти, с цел да се проследи динамиката на тяхното развитие, се

установява, че в първи курс преобладават студенти с ниско (43 %) и средно (43 %) ниво. В групата на завършващите най-голям е процента на тези с високо ниво (67 %), при средното ниво се наблюдава спадане на стойностите – 33 %, а ниско ниво не се установява.



Фиг. 2: Динамика на двете групи изследвани студенти по отношение на музикално-историческите знания, умения, компетентности

Тази положителна тенденция показва, че в процеса на своето обучение голяма част от бъдещите музикални педагози осъзнават необходимостта от овладяването на музикално-исторически знания, умения, компетентности за своята бъдеща професионална реализация; проявяват отговорно отношение към този етап от своето обучение, разбирайки, че нивото на тяхната подготовка е определящо за успеха в бъдещата им работа, за тяхното професионално израстване. При по-детайлен анализ на резултатите в двете групи прави впечатление, че има въпроси (2, 5, 13, 15) при които не се наблюдава почти никакво развитие или се запазва малкия процент на верните отговори. Тези данни са индикатор, който може да послужи за планиране на бъдещата работа, насочена към постигане на още по-добри резултати в подготовката на обучаваните специалисти.

### 3. Заключение

Настоящото проучаване на нивото на музикално-историческите знания, умения, компетентности на студентите дава информация, която може да послужи като отправна точка в търсенето на подходи за усъвършенстване процеса на подготовка на бъдещите професионалисти. Проведеното изследване на студентите от специалност „Педагогика на обучението по музика“, съвместно с реализирани други, свързани с различни аспекти от подготовката на музикалните педагози, осигурява възможност за характеристика и изследване на цялостния профил на бъдещите учители по музика. Обобщените данни и направените изводи са основание за оптимизиране на обучението, което да гарантира подготовката на успешни и уверени музикални специалисти.

#### Литература

1. Абдулин, Э., Николаева, Е. Теория музыкального образования. Москва, Академия, 2020
2. Арчажникова, Л. Профессия-учитель музыки: Книга для учителя. Москва, Просвещение, 1984
3. Атанасов, Х. Хоровото пеене и дирижиране като интерактивно образователно пространство. В: XII Международна научна конференция „ТЕХНИКА. ТЕХНОЛОГИИ. ОБРАЗОВАНИЕ. СИГУРНОСТ 2024“ (International scientific conference Engineering, technologies. education. Security), 2024, с. 84-86
4. Панчева-Георгиева, А. Музикално-историческата компетентност на бъдещите учители по музика. В: Годишник на Шуменския университет „Еп. К. Преславски“, Педагогически факултет, том XXIX, 2025, с. 94-103. ISSN 1314-6769

5. Панчева-Георгиева, А. Образователният потенциал на музикалното изкуство за формиране на художествено-изпълнителска култура у бъдещите учители по музика. (Дисертационен труд). ШУ „Еп. К. Преславски“. Шумен, 2022
6. Программы общеобразовательных учреждений – Музыка. Москва, „Просвещение“, 2006, стр. 17  
<https://www.scribd.com/document/468604332/Studmed-ru-kabalevskiy-db-ruk-programmy-obscheobra>
7. Рускова, Я. Компетентностен модел на учителя по музика. Шумен, УИ „Еп. К. Преславски“, 2022
8. De Luca, M. Constructing music history in the classroom. *Musica Docta. Rivista digitale di Pedagogia e Didattica della musica*, pp. 113-121  
<https://musicadocta.unibo.it/article/view/6577>
9. Gagim, I. *Stiinta si arta educatiei musicale*. Chishinau: Editura Arc, 1996
10. Granetkaia, L., Formation of interpretation competence of the musical image at music teacher. In: *Review of Artistic Education*, Editura ARTES, 2012, p. 40-46
11. Nikolai, H., Lynenko, A., Koehn, N., Boichenko, M. Interdisciplinary coordination in historical-theoretical and music-performing training of future musical art teachers. *Journal of history culture and art research*, 9 (1), 2020, p. 225-235  
[https://www.researchgate.net/publication/340833901\\_Interdisciplinary\\_Coordination\\_in\\_Historical-Theoretical\\_and\\_Music-Performing\\_Training\\_of\\_Future\\_Musical\\_Art\\_Teachers](https://www.researchgate.net/publication/340833901_Interdisciplinary_Coordination_in_Historical-Theoretical_and_Music-Performing_Training_of_Future_Musical_Art_Teachers)
12. Road Map for Arts Education The World Conference on Arts Education: Building Creative Capacities for the 21st Century Lisbon, 6-9 March 2006, c. 14  
<https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000384200>
13. Tereshchenko, S., Sopin, O., Mitieva, A., Kotova, L., & Sopina, L. Methodological aspects of forming project competence in the process of professional training of music teachers. *Revista Eduweb*, 17(3), 2023, p. 71-80
14. <https://europass.europa.eu/bg/description-eight-efl-levels>
15. [https://www.navet.government.bg/bg/media/NQF\\_bg.pdf](https://www.navet.government.bg/bg/media/NQF_bg.pdf)
16. [https://ruo.mon.bg/sofia-grad/files/sites/2/2021/10/2\\_0.pdf](https://ruo.mon.bg/sofia-grad/files/sites/2/2021/10/2_0.pdf)
17. <https://www.mon.bg/obshto-obrazovanie/uchebni-planove-i-programi-2/uchebni-programi/uchebni-programi-za-obsthoobrazovatelna-podgotovka/>



## Основни аспекти на диригентския жест като мануално-пластичен модел на звученето на музикалното произведение

Main aspects of the conductor's gesture as a manual-plastic model of the sound of a musical work

Hristo A. Atanasov

ИИУ "Епископ Константин Преславски"

**ABSTRACT:** The paper provides a concise account of the characteristics and objectives of conducting gestures as a manual and plastic representation of the sounding form of a musical work, while identifying the musical parameters upon which the conductor may, under certain circumstances, exert a decisive influence.

**KAYWORDS:** CONDUCTING, CONDUCTING GESTURE, MODELLING.

**РЕЗЮМЕ:** В доклада в синтезиран вид се описват характеристиките и целите на диригентските жестове като мануално-пластичен модел на звученето на музикалното произведение като се посочват музикалните параметри, върху които диригентът при определени обстоятелства може да окаже решаващо влияние.

**КЛЮЧОВИ ДУМИ:** ДИРИЖИРАНЕ, ДИРИГЕНТСКИ ЖЕСТ, МОДЕЛИРАНЕ.

В научната литература и диригентска практика диригентският жест се очертава като единствено по рода си музикално-изпълнителско средство, което реално и действено (физически) се разполага в пространството като се развива във времето, прави видимо „движението на звука” и предизвиква определено звучене [2]. Единодушно е становището, че диригентският жест е труден за описание, тъй като често пъти жестовете, движенията, начините - необходими и оправдани при изпълнението, извън него губят своята изразителност и стават схематични и формални. (Durrant, 2003; Garnett, 2005; Ramona Wis, 1999, Илья Мусин 1967 и др.).

Същевременно, позовавайки се на изследванията на редица съвременни автори, като Анита Б. Кумар, Стивън Дж. Морисън [11], обобщават, че наблюдението на музикално изпълнение е мултимодално преживяване, в което играят роля както визуални, така и слухови фактори. Визуалният компонент на дирижирането е от решаващо значение за възприемането на различни интерпретации (Madsen et al., 2007, 2009). От гледна точка на изпълнителя, визуалната информация е също толкова важна, колкото и слуховата при ансамбловото свирене. Констатациите на Fredrickson [10] подкрепят тази идея, че „комбинацията от слухова и визуална информация може да доведе до по-добра обработка на информацията“.

Дефинирайки дирижирането като трансформация на абстрактната музикална идея в конкретна визуална материя се доближаваме до налагащото се в научните разработки становище, че „...диригентските жестове като специфична система на движение на ръцете представлява мануално-пластичен модел на звученето на музикалното произведение...“ [4], който от своя страна се тълкува и като педагогически и психологически метод за превръщане на абстрактните звукови процеси във видими, тактилни и кинестетични образи (движения на ръцете и тялото) и по този начин помага на изпълнителя или слушателя да „оформи“ звука, преживявайки го физически.

Тази перспектива предоставя концептуална основа за анализ на редица изследователи (Лиз Гарнет, Corbalán, 2010; Corbalán et al., 2023, Liao и Davidson 2016) за това как диригентите интернализират и предават музикалното значение, конструирано в съзнанието им, влияейки на изпълнителите и на публиката.

За изпълнителите като пространствено-времева схема диригентският жест изгражда физическите граници на творбата относно:

- дълбочина и форма на звука - чрез вертикални и хоризонтални движения диригентът „моделира“ фразата, задавайки нейната динамика (сила) и артикулация (легато, стакато и т.н.);
- метрична пулсация – тактовите модели (схемите на тактуване) служат като видим ориентир, който

поставя ансамбъла в общ времеви поток, помагайки на музикантите да дишат и свирят/пеят синхронизирано.

За публиката диригентският жест е своеобразен физически преводач, който и правейки видим звука визуализира чрез:

- кинестетична емпатия - огледалните неврони в мозъка, движенията на тялото карат слушателя несъзнавано да съпреживее физическото усилие и емоцията на музиката (напрежение, разпускане, кулминация).
- разказ чрез жест - изразителността на ръцете, раменете и мимиката, абстрактните звукови процеси се превръщат в разпознаваеми визуални жестове (плавност, острота, нежност), които придават форма на невидимото изкуство.

В изследването си Morten Schuldt-Jensen доказва, всеки модел на диригентските жестове никога не е един и същ, и че една и съща музика звучи различно при промяната им. Използването на определени модели на диригентските жестове или техни варианти от диригента, т.е. неговият „личен стил“, трябва да изразява умишлен артистичен избор във всеки един случай [15].

В смисъла на концепцията за управление на процеси в реално време в областта на музикалното изкуство моделът фиксира художествената действителност, т.е. чрез понятието „модел” можем да очертаем реалния, обективно съществуващ свят на музиката и въображаемия абстрактен моделен свят, който продукт на информацията, породена от мисловно емоционалната дейност на диригента във вид на представи и емоционални преживявания [3]. Изграждането на тази връзка фокусира вниманието към диригентския жест като обект на моделиране насочено към:

- музикално ориентирана прецизност и експресия;
- специфични и целенасочени форми на дирижиране;
- мотивирането на определена философия на

музикалното изпълнение.

като му придава смисъла на метод, който:

- притежава строго специфични възможности за отразяване на художествената действителност, както и различен хронотоп (закономерна връзка на пространствено-времевите координати);
- определя възможностите за съчетаване между жестовете (знаците) при изграждането на диригентската техника;
- притежават свои специфични правила за организация на информацията и тези правила са свързани с нейното разбиране.

Предвид същността на диригентското изкуство като относително прецизен мануален модел на музиката по



отношение на нейното съдържание и форма, моделирането на диригентските жестове се основава на художествения материал (телесна пластика) и художествените средства (изразителни движения) на лицево-пластичните изкуства и в най-общ аспект има за цел:

- *Визуализация на звука*: „превеждане“ на характеристиките на звука (динамика, тембър, шрих) чрез пластични движения;
- *Свързване на форма и съдържание*: осмисляне чрез движенията на структурната организация на произведението – как частите се развиват и взаимодействат;
- *Активно възприемане*: преживяване и изразяване на емоциите и идеите, с които е изпълнено всяко музикално произведение.

Това като цяло са музикалните параметри, върху които диригентът би могъл да желае - и при определени обстоятелства наистина може - да окаже решаващо влияние, чрез определено моделиране на диригентските жестове. По този начин изпълнителите ще получат информация за това как да произведат звука и да реагират съответно върху аспектите на всяка една от тези музикално-изпълнителски категории.

Функционалните характеристики на умишлено моделираните диригентски жестове, изразяващи артистичния избор на диригента в най-общ вид са следните:

- *прецизните (схематичните) жестове* контролират точното отброяване на времената в такта, сигналите и предупрежденията, активиращи вниманието; които показват точното време и посока, когато диригентът маркира ударната точка (the ictus), той свързва движението с конкретния момент на метричното време;

- *жестовите, изобразяващи (имитиращи) физически усилията на музикалните изпълнители*, контролират физическото производство на звук, неговия характер;

- *жестовите, пренасящи логическата структура и музикалната мисъл в „позитивно-понятиен“ аспект*, който ансамбъла (хор, оркестър и др.) дешифрира, освобождават музикално-ориентираната прецизност и експресия;

- *психо-социално познатите жестове* насърчават взаимозависимостта;

- *жестовите, облекчаващи напрежението*, освобождават по-свободно и независимо производство на тона [15].

В хода на това естество може да се направи заключението, че диригентските жестове като мануално-пластични модели на звученето на музикалното произведение „могат да бъдат разгледани от две различни гледни точки: 1) като рамка за действията на музикантите, предизвикващи директна акустична, физическа реакция; и 2) като символи, подлежащи на интерпретация като ритуален език със собствен синтаксис и може би дори като самостоятелна форма на изкуство.“ [пак там]

„... По същество дирижирането е да накара музикантите да свирят по най-добрия начин и да могат да използват енергията си и да получат достъп до своята гледна точка за музиката. Има връзка между жестовите, физическото присъствие, аурата, която диригентът може да проектира, и това, което музикантите произвеждат.“ [Gilbert, Alan].

## ЛИТЕРАТУРА:

1. Мусин, И. Техника дирижирования. Л. 1967.
2. Панова, Ю. Музикално-педагогически проблеми на обучението по „Дирижиране от клавиър“ на студентите от специалност Педагогика на обучението по музика. Дисертация. ШУ „Епископ К. Преславски“. 2013.
3. Панова, Ю. Моделиране и управление на музикално-изпълнителският процес, УИ „Епископ Константин Преславски“, 2021, ISBN: 978-619-201-510-7
4. Цовякова И. А. – Ассоциативный подход в процессе обучения дирижированию, Афтореферат, Москва 2009
5. Corbalán, M. (2010) Relations between Cognitive Psychology and Music Memory: An Empirical Approach. SONUS, A Journal of Investigations into Global Musical Possibilities, 31(1), 1-13.
6. Corbalán, M., Pérez-Echeverría, M. P., & Pozo, J. I. (2023). Promoting learning and interaction during choir rehearsal: A comparison of two conduction profiles. Teaching and Teacher Education, 121, 103940.
7. Durrant, C. Choral conducting, philosophy and practice, London: Routledge, 2003
8. Garnett, L. Research report: Gesture, style and communication., Master Singer 55 Spring, 2005; B: Val-Claraco, Ana. Casanova, Oscar,
9. Gilbert, Alan. Connecting Music and Gesture. Transcript excerpts. Music director of the New York Philharmonic, demonstrates and discusses the role of a conductor. [http://www.nytimes.com/interactive/2012/04/06/arts/music/the-connection-between-gesture-and-music.html?\\_r=0](http://www.nytimes.com/interactive/2012/04/06/arts/music/the-connection-between-gesture-and-music.html?_r=0). Достъпно на 24.07.2026.
10. Fredrickson W. E. (1994). Band musicians' performance and eye contact as influenced by loss of a visual and/or aural stimulus. J. Res. Music Educ. 42:306–317. 10.2307/3345738; B: [Kumar](#), Anita B., [Morrison](#), Steven J.
11. Kumar, Anita B., [Morrison](#), Steven J. The Conductor As Visual Guide: Gesture and Perception of Musical Content. ORIGINAL RESEARCH article. Front. Psychol., 08 July 2016. Sec. Performance Science. Volume 7 - 2016 <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2016.01049>
12. Liao, M.-Y., & Davidson, J. W. (2016). The effects of gesture and movement training on the intonation of children's singing in vocal warm-up sessions. International Journal of Music Education, 34(1), 4-18. <https://doi.org/10.1177/0255761415614798>
13. Madsen C. K. Geringer J. M. Madsen K. (2009). Adolescent musicians' perceptions of conductors within musical context. J. Res. Music Educ. 57:16–25. 10.1177/0022429409333352.
14. Madsen C. K. Geringer J. M. Wagner M. J. (2007). Context specificity in music perception of musicians. Psychol. Music 35:441–451. 10.1177/0305735607072655.
15. Schuldt-Jensen, Morten. What Is Conducting? Signs, Principles, and Problems. OpenEdition Journals. Бр. 6. 2015. ISSN електронно издание: 2565-7097. с. 383-421
16. Val-Claraco, Ana. Casanova, Oscar. Expressiveness in choral conducting: Key insights and approaches from expert conductors. International Journal of Music Education. 2026. с.3. <https://doi.org/10.1177/02557614261420617>

# Позицията на диригента като част от активния процес на пресъздаване на музикалното произведение

The conductor's position as part of the active process of recreating the musical work

Hristo A. Atanasov

ШУ "Епископ Константин Преславски"

**РЕЗЮМЕ:** В доклада се разглеждат ролята на диригента в основните етапи на транслиране на музикалното произведение от композитора до слушателя, очертават се основните му задачи през всичките фази на този процес, както и възможностите, които той има за директно влияние на процеса, макар и само за ограничен период от време.

**КЛЮЧОВИ ДУМИ:** ДИРИГЕНТ, ИНТЕРПРЕТАТОР, ИЗПЪЛНИТЕЛ.

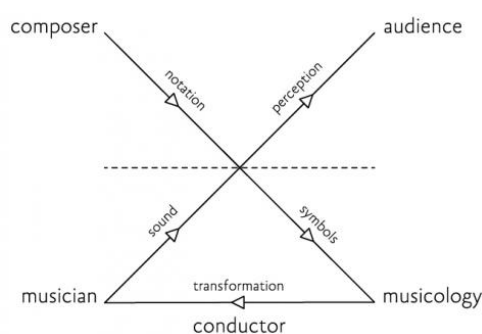
**ABSTRACT:** The paper examines the role of the conductor throughout the principal stages in the transmission of a musical work from the composer to the listener. It outlines the conductor's main responsibilities at each stage of this process, as well as the opportunities for direct influence that the conductor can exercise over the performance, albeit only for a limited period of time.

**KEYWORDS:** CONDUCTOR, INTERPRETER, PERFORMER.

Специфичните особености на дейността на диригента (колективен характер на изпълнението, отсъствие на реално звучене на ансамбъла при началния период на разучаване на партитурата, организацията и управлението на изпълнителската дейност, необходимостта от вътрешно слушане и мислене на диригента) го правят уникален тип музикант и отличават дирижирането от другите видове музикално-изпълнителски дейности. В този аспект В. Арнаудов определя хоровия диригент като „изпълнител, който сам прави инструмента си“. Това, че „инструмента“ на диригента се явява състав от музиканти, от множество личности с различно ниво на подготовка, различни психически индивидуалности, характери и темпераменти, определя психологическата характеристика на диригентската дейност [1].

На практика диригентът е в постоянен обмен с партитурата на музикалното произведение, тоест с композитора, ансамбъла като цяло и отделните му членове, както и с публиката, а действията му предизвикват очаквания и на трите групи [4]. Транслирането на музикалното произведение от композитора до слушателя, неговото вътрешно виждане се очертава като основна задача на диригента като през всичките фази на този процес той има възможност да влияе директно на процеса само за ограничен период от време.

Мортен Шулдт-Йенсен определя този процес като „триъгълника на диригента“, изобразявайки схематично основните му етапи:



Мортен Шулдт-Йенсен

**Първият етап** (дорепетиционен) Този етап се свързва с предварителната работа на диригента над партитурата на произведението, която се явява:

- главния източник на необходимата информация при разкриване на съдържанието на музиката;
- вътрешен неин духовен облик в реално време чрез създаване на дълбоко лична концепция за изпълнение му.

Поради тази причина този етап от процеса е от решаващо значение за диригента като основната му цел е да:

- идентифицира музикалното намерение на композитора;

- изгради изпълнителската си концепция за превъплъщаване на замисъла на композитора;
- определи начините за постигане на художествени резултати;
- изготви план за работа над произведението.

Характерно за този етап е отсъствието на реалното звучене на ансамбъла. Това налага озвучаване на партитурата (чрез изсвирване и/или изпяване), като целта е не само да се знае звученето на партитурата като цяло, но и да се определят и анализират трудните (специфични) за изпълнение места (мелодически, хармонически, ритмически). Изсвирването и/или изпяването на партиите и техните комбинации се извършва в удобно темпо, така че то да бъде точно и вярно в ритмическо и интонационно отношение.

Друг съществен момент от този етап се свързва с определянето на:

- специфичните елементи на музикалната нотна система и музикално-изразните средства, използвани в музикалния текст на конкретното произведение;
- вида на изпълнителския състав и начина на изписването му в конкретна партитура, диапазона (амбитус) на партиите по отделно и на хора като цяло, формата и музикалния език на произведението;
- епохата, стилите особености и фактурата му.

Това от своя страна изисква задълбочено познаване, разбиране и владение на музикалната терминология, музикалната нотна система, музикално-изразните средства, диригентската и вокално/инструментално-изпълнителската техника.

Така се създават необходимите условия за задълбочен анализ на съдържанието на партитурата и изграждането на собствена концепция за реализиране на музикалното произведение, което от своя страна е основа за изграждане на музикалния образ в съзнанието на диригента.

Представянето на произведението чрез използване на думи и предимно символични жестове, в горе посочената схема диригентът може да е поставен в десния „музикологичен ъгъл“, т.е. тук той се представя като музикологът, който на базата на теоретичните методи анализира творбата, създадена от композитора, нейната история, социален контекст и музикално-изразно съдържание.

**Втори етап** (репетиционен) – реализация на изпълнителския замисъл в процеса на репетиция. На базата на предварително овладяване на партитурата диригентът взема конкретни решения относно изпълнението ѝ с цел намиране и постигане на нейния най-добър творчески еквивалент, предизвикващ съответните емоционални реакции, както на изпълнителите, така и на слушателите. Във времето, когато диригентът предава кодираната идея на ансамбъла и управлява координирането на музикалните събития в неговата партитура, т.е. трансформацията ѝ в звук – често с много различни резултати се определя и връзката между него и изпълнителите.

Използването на функционална диригентска техника, съответно воденето на ансамбъла към музикално-изпълнителска и художествена реализация на произведението го прави „*primus inter pares*“ сред „колегите“ музиканти“ [4], позиционирайки го в левия ъгъл на схемата.

*Трети етап* (концертно изпълнение) - в този етап се проявява в най-голяма степен спецификата на изкуството на диригента. Според В. Л. Живов тази специфика се определя и от факта, че неговия инструмент, оръдието на неговото творчество е самия той. Той трябва ясно, изразително и емоционално да предаде на изпълнителите своите творчески намерения. Ако на репетиция той въздейства на изпълнителите с помощта на словесни разяснения и изпълнителски показ (с глас или инструмент), то на концерта диригентът се възприема от изпълнителите и публиката само визуално. Насочвайки в бъдещето настоящите действия, диригентът постоянно изпреварва действията на изпълнителите на определен „видим“ интервал от времето, което му дава възможност не само да подготвя и регулира техните действия, но и вътрешно да пресъздава произведението, усещайки го като обемна и цялостна художествена конструкция [2]. По време на концертно изпълнение трябва да прецени спецификата на изпълнителския състав, както и акустичните параметри на концертната зала със и без публика. „Както всеки друг музикант, диригентът се вълнува и дори спонтанно развива нови музикални идеи по време на изпълнението. Следователно, това, което той и ансамбълът репетира, трябва да може да се променя до известна степен, за да се постигне артистичен оптимум в акустично и духовно новата среда на всяко изпълнение.“ [4].

В този етап на пресъздаване на музикалното произведение „...не се очаква диригентът да предложи своя собствена, индивидуална интерпретация. Той не се усеща просто като свързващо звено между композитора и слушателя, а като личност, която чрез своята индивидуална и

съответстваща на композиторските търсения интерпретация той добавя нов елемент в композицията.“ [5]. В този момент триъгълникът се затваря, но на ниво което в реален момент поставя диригента в качеството му на изпълнител, „виртуоз и сам по себе си артист“ [6].

Артистичните способности на диригента пряко се свързват с „емоционалното представяне съдържанието на музиката, предизвикване на ответната емоционална реакция на певците и чрез нея – съпреживяването на слушателите.“ [3]. В концертното изпълнение диригентът реагира спонтанно, предавайки енергия и емоция, и по този начин въздейства както над изпълнителския състав, така и над публиката. Публиката вече не идва само заради композицията, но и заради неговата интерпретация“ [5].

## ЛИТЕРАТУРА

1. Арnaudов В. – НД “Хоризонт” (Варна), №3,27 май 1984
2. Живов В. Л. - Исполнительский анализ хорового произведения, Музыка, Москва, 1987
3. Мусин, И. Техника дирижирования. Л. 1967.
4. Morten Schuldt-Jensen. What Is Conducting? Signs, Principles, and Problems. *Annales des sémiotiques. OpenEdition Journals. Signata*. Бр. 6. 2015. ISSN електронно издание: 2565-7097. с. 383-421
5. Honingsheim, P. & Etzkorn, K. P. (1989). *Sociologists and Music: An Introduction to the Music and Society*. London: Transaction Publishers, p. 109. <https://books.google.me/books?id=fCU37OeOwvUC&printsec=copyright#v=onepage&q&f=false>
6. Sandt, J. van der (2017). *Choral Conducting: History and Didactics*, Lucca: Libreria Musicale Italiana, p. 3; В: Григоров, Григор. Невербална комуникация в диригентската работа. Автореферат. София. 2021.

## Beyond Reproductive Autonomy: Three Ethical Arguments for Normalizing Elective Oocyte Cryopreservation in an Age of Reproductive Crisis

Aleksandra Traykova  
Bulgarian Academy of Sciences  
4 Serdika Str., Sofia, Bulgaria  
al.tra@abv.bg

**Abstract:** *This paper outlines three main arguments in favour of normalizing the practice of elective oocyte cryopreservation, also known as “social egg freezing”. The first two arguments are related and represent a distinctively value-oriented rather than goal or process-oriented outlook on the matter, which differs from the standard bioethical focus on the bodily aspects of reproductive autonomy. The third argument brings our attention back to the body, highlighting the transient nature of health and rejecting the notion that only currently ill or incapacitated persons should be considered a morally acceptable candidates for elective oocyte cryopreservation.*

# A competency model for training specialists in biological security in the context of bioconvergence

Nenovska, M. I., Ph.D, Chief Assistant Professor  
 “G. S. Rakovski” National Defence College, Sofia, Bulgaria  
 m.nenovska@rndc.bg

**Abstract:** The rapid advancement of biotechnology, artificial intelligence, big data analytics, and digital technologies is transforming the nature of biological risks and creating new challenges for security systems. At the same time, the processes of bioconvergence are fostering increasingly close interactions among the life sciences, engineering, information technologies, and security studies. This paper explores the implications of these developments for the education and training of biological security specialists. Drawing on a systems approach, comparative analysis, and conceptual modelling, the analysis identifies the key competencies required for effective professional performance in a dynamic technological environment. An original competency model is proposed, integrating fundamental biological knowledge, technological competencies, security-related expertise, and practical skills for biological risk management. The model provides a conceptual framework for the modernization of educational programmes and for strengthening sustainable capacity to address biological threats.

**Keywords:** BIOLOGICAL SECURITY, COMPETENCY MODEL, BIOCONVERGENCE, COMPETENCIES, TECHNOLOGICAL TRANSFORMATION, ARTIFICIAL INTELLIGENCE.

## 1. Introduction

The contemporary security environment is being reshaped by rapid advances in the life sciences and digital technologies, fundamentally transforming the nature of biological risks and the approaches used to manage them. The development of synthetic biology, genome editing, artificial intelligence, and related technologies creates significant opportunities while simultaneously introducing new challenges for biological security [1, 2, 4].

Bioconvergence, which integrates the life sciences with engineering and digital technologies, further increases the complexity of biological security and creates new requirements for the education and training of specialists. However, existing educational models remain largely discipline-based and do not adequately address the interdisciplinary competencies required in this rapidly evolving environment [2, 5, 7, 20].

This paper examines the implications of bioconvergence and technological transformation for the education and training of biological security specialists and proposes an original competency model aligned with contemporary professional requirements. By integrating biological, technological, and security-related competencies within a unified conceptual framework, the proposed model addresses an important gap in current competency-based education for biological security.

## 2. Methodology

The research methodology combines literature analysis, a systems approach, comparative analysis, and conceptual modelling, which together provide the methodological foundation for the development of an original competency model.

The study began with an analysis of scientific publications, international reports, and strategic documents addressing biological security, bioconvergence, advances in biotechnology, competency-based education, and the transformation of education in the context of digitalization [1–7, 20, 23]. The purpose of this analysis was to identify the principal trends and factors shaping the emerging requirements for the education and training of biological security specialists.

Using a systems approach, the education and training of biological security specialists was examined as a complex system comprising educational institutions, curricula, technological infrastructure, and the professional environment. This approach enabled an analysis of the interrelationships among these components and their influence on the development of the competencies required for effective professional practice. Such a methodological perspective provides a structured framework for investigating dynamic processes and deriving applicable solutions in the field of security [25].

Comparative analysis was employed to examine the differences between traditional educational models and the contemporary requirements arising from bioconvergence and technological transformation. This made it possible to identify the principal areas in which educational content and training approaches require updating to meet the evolving demands placed on biological security specialists.

Based on the findings of these analyses, an original competency model was developed using the method of conceptual modelling. The proposed model represents a conceptual framework that systematizes the principal competency domains and the relationships among them, with the aim of supporting the education and training of biological security specialists in the context of bioconvergence and the accelerated advancement of digital technologies.

The integrated application of these methodological approaches enabled the synthesis of the findings derived from the theoretical and comparative analyses into a unified competency model aligned with contemporary developments in biological security, bioconvergence, and competency-based education.

## 3. Theoretical Foundations of the Competency-Based Approach to the Education and Training of Biological Security Specialists

Rapid advances in the life sciences, digital technologies, and technological innovation are reshaping professional education and training across multiple disciplines. In response, Competency-Based Education (CBE) has emerged as a leading educational paradigm, emphasizing learning outcomes and the application of knowledge, skills, and professional attitudes in real-world contexts [20, 23]. Consistent with the European Qualifications Framework (EQF), competence is understood as the demonstrated ability to apply knowledge, skills, and personal attributes in professional practice and to assume responsibility in diverse contexts [20]. This understanding is also reflected in the Bulgarian pedagogical literature [23].

International organizations, including UNESCO and the European Commission, recognize competency development as essential for strengthening the resilience of educational systems and supporting adaptation to digital transformation [7, 15, 20]. The principal characteristics of competency-based education are summarized in Table 1.

Competency-based education promotes professional adaptability, critical thinking, teamwork, and lifelong learning while providing a systematic basis for curriculum design and learning outcome assessment [20, 23, 24].



**Table 1:** Principal Characteristics of Competency-Based Education

| Characteristic                                                                                                                                           | Description                                                                                                                |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  <b>Orientation towards learning outcomes</b>                           | Focus on achieving specific, measurable results that reflect the competencies acquired by learners.                        |
|  <b>Integration of knowledge, skills and professional attitudes</b>     | Combining theoretical knowledge, practical skills and professional attitudes into a comprehensive professional competence. |
|  <b>Active participation of learners in the educational process</b>     | Emphasizing independent work, initiative and responsibility of the learners.                                               |
|  <b>Use of practical tasks, case studies and simulations</b>            | Applying real or realistic situations to develop practical skills and the ability to make decisions.                       |
|  <b>Continuous assessment of competency acquisition</b>                 | Conducting systematic and ongoing feedback to monitor progress and support learners' improvement.                          |
|  <b>Personalization of learning in accordance with individual needs</b> | Adapting the learning process to individual goals, prior experience and learning pace.                                     |
|  <b>Development of readiness for lifelong learning</b>                  | Fostering self-directed learning skills, adaptability and motivation for continuous professional development.              |

In the field of biological security, the competency-based approach has become increasingly important in response to bioconvergence and rapid technological transformation. Specialists are expected to integrate expertise in the life sciences, digital technologies, risk management, and security studies. The competency model proposed in this study addresses these requirements by providing an interdisciplinary framework that integrates biological, technological, security, and social competencies to support the education and training of biological security specialists [1, 2, 4, 5].

#### 4. Bioconvergence and Technological Transformation as Drivers of Change in the Biological Security Environment

Bioconvergence, driven by the integration of the life sciences, digital technologies, engineering, and artificial intelligence, is transforming medicine, public health, industry, and security systems. Advances in bioinformatics, big data analytics, automated laboratory systems, and artificial intelligence have significantly enhanced the analysis of biological data and accelerated the development of pharmaceuticals, vaccines, diagnostic methods, and public health preparedness capabilities [2, 4, 5, 6, 10, 11].

At the same time, technologies such as synthetic biology, genome editing, automated DNA synthesis, and artificial intelligence increasingly exhibit dual-use potential, expanding biological risks and requiring appropriate regulatory frameworks, including Regulation (EU) 2021/821 [1, 3, 4, 19, 26, 27].

Digitalization has also introduced new cyber-biological risks associated with biological databases, cloud-based platforms, and automated laboratory systems. Consequently, the biological security environment has become increasingly interconnected, complex, and uncertain, requiring specialists to combine expertise in the life sciences, digital technologies, cybersecurity, and risk management [5, 12, 13, 17, 18, 19, 28].

These developments highlight the need for competency-based educational models capable of preparing specialists to work with emerging technologies, assess evolving biological risks, and make informed decisions in an increasingly technology-driven security environment. The competency model proposed in this study is designed to address these emerging educational requirements [5, 16, 20, 23, 28].

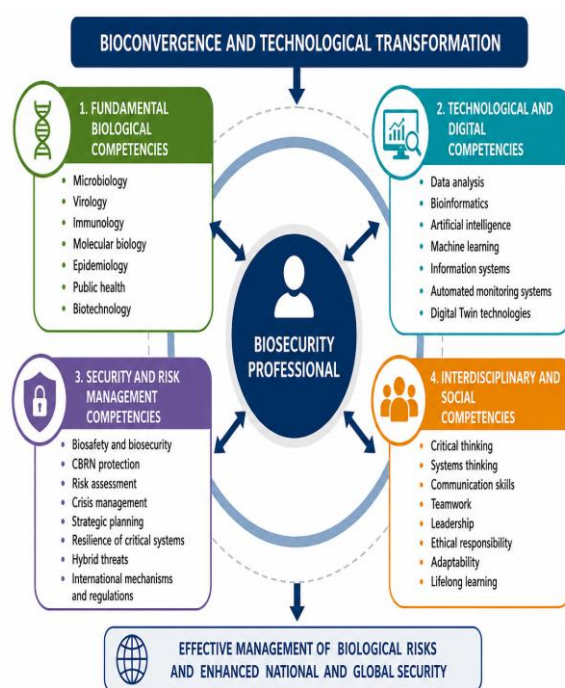
#### 5. An Original Competency Model for the Education and Training of Biological Security

### Specialists in the Context of Bioconvergence and Technological Transformation

#### 5.1. Rationale for Developing the Competency Model

The need for a competency model arises from the growing mismatch between traditional educational programmes and the evolving professional requirements associated with bioconvergence and technological transformation. While conventional education has primarily focused on providing knowledge in microbiology, epidemiology, toxicology, and biological risk management, contemporary professional practice requires the integration of competencies related to digital technologies, data analytics, bioinformatics, artificial intelligence, and the management of complex risks [2, 5, 20, 23].

Based on the analysis of the scientific literature and the identified trends, an original competency model was developed (Figure 1). The proposed model comprises four interrelated competency domains that collectively define the knowledge, skills, and capabilities required of the contemporary biological security specialist.



**Figure 1.** Competency Model for the Education and Training of Biological Security Specialists in the Context of Bioconvergence and Technological Transformation

#### 5.2. Structure of the Competency Model

The proposed competency model comprises four interrelated competency domains:

- Fundamental biological competencies
- Technological and digital competencies
- Security and risk management competencies
- Interdisciplinary and social competencies

At the core of the model is the biological security specialist, conceived as an interdisciplinary professional capable of integrating knowledge and skills from multiple scientific disciplines and operating effectively in complex, dynamic, and technology-intensive environments.

##### 5.2.1. Fundamental Biological Competencies

The first competency domain provides the scientific foundation for the education and training of biological security specialists. It encompasses knowledge of microbiology, virology, immunology, molecular biology, epidemiology, public health, and biotechnology. Despite the rapid advancement of digital technologies, these competencies remain fundamental to understanding biological processes, assessing biological risks, and interpreting specialized scientific data.

Particular emphasis is placed on competencies related to emerging biotechnologies, including synthetic biology, genome editing, and bioengineering, which are reshaping biological security systems and introducing new challenges for biological risk management [1, 2, 4].

### 5.2.2. Technological and Digital Competencies

The second competency domain reflects the impact of bioconvergence and digital transformation on professional practice in the field of biological security. Professionals working in the field of biological security are expected to possess knowledge and practical skills in bioinformatics, big data analytics, artificial intelligence-based tools, automated laboratory technologies, and digital platforms for information management and exchange. These competencies enable the analysis and interpretation of biological data, the simulation of complex biological systems, and evidence-informed decision-making.

In addition to technical expertise, this domain emphasizes the development of digital literacy and the capacity to adapt to rapidly evolving technologies. Such capabilities are particularly important in a dynamic technological environment, where continuous learning and the acquisition of new digital skills have become essential prerequisites for effective professional performance [5, 16, 20, 28].

### 5.2.3. Security and Risk Management Competencies

The third competency domain focuses on developing the knowledge and skills required to assess, prevent, and manage biological risks within an evolving security environment. It includes competencies related to biological security, biosecurity, risk management, crisis management, cybersecurity, and the regulatory frameworks governing activities involving potential biological risks.

Particular importance is attached to situational awareness, the ability to analyse complex threats arising from the convergence of biological and digital technologies, and informed decision-making under conditions of uncertainty [8]. In this respect, the domain extends traditional educational approaches by incorporating concepts of resilience, interinstitutional cooperation, and the management of complex risks that characterize the contemporary security environment [1, 3, 14, 19, 27, 28].

### 5.2.4. Interdisciplinary and Social Competencies

The fourth competency domain integrates the competencies required for the effective application of professional knowledge in real-world settings. These include critical and systems thinking, analytical skills, communication, leadership, teamwork in multidisciplinary environments, project management, and adherence to professional and ethical standards.

Biological security is inherently interdisciplinary, and effective biological risk management depends on close collaboration among specialists in the life sciences, engineering, information technologies, public health, and national security. Consequently, education and training should foster not only disciplinary expertise but also the capacity for coordination, effective communication, and collaborative problem-solving. Furthermore, lifelong learning and continuous professional development have become essential for maintaining professional competencies in the context of rapid technological change [7, 20, 23, 24].

The four competency domains should not be viewed as independent components but as an integrated system in which

fundamental biological knowledge, technological and digital competencies, security and risk management competencies, and interdisciplinary and social competencies complement and reinforce one another. Their interaction determines the ability of biological security specialists to respond effectively to the challenges arising from bioconvergence and technological transformation.

For greater clarity, the principal competency domains together with their corresponding knowledge, skills, and professional capabilities are summarized in Table 2.

**Table 2:** Structure of the Original Competency Model for the Education and Training of Biological Security Specialists

| COMPETENCY AREA                                                                                                                       | KEY COMPETENCIES                                                                                                                                                                                                                                             | PRACTICAL APPLICATION OF COMPETENCIES                                                                                                      |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  <b>Fundamental Biological Competencies</b>          | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Microbiology</li> <li>• Virology</li> <li>• Immunology</li> <li>• Epidemiology</li> <li>• Synthetic biology</li> <li>• Genome editing</li> <li>• Bioengineering</li> </ul>                                          | Analysis and assessment of biological processes, identification and evaluation of biological threats.                                      |
|  <b>Technological and Digital Competencies</b>       | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Bioinformatics</li> <li>• Big Data</li> <li>• Artificial Intelligence</li> <li>• Digital platforms</li> <li>• Automated laboratory systems</li> <li>• Digital modeling</li> </ul>                                   | Use of digital technologies for data analysis, process modeling and support for decision-making.                                           |
|  <b>Competencies in Security and Risk Management</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Biological security</li> <li>• Bioprotection (biosafety and biosecurity)</li> <li>• Risk assessment</li> <li>• Crisis management</li> <li>• Cybersecurity</li> <li>• Regulatory framework and compliance</li> </ul> | Assessment and management of biological risks, planning and coordination of activities in crisis situations.                               |
|  <b>Interdisciplinary and Social Competencies</b>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Systems and critical thinking</li> <li>• Communication</li> <li>• Leadership</li> <li>• Teamwork</li> <li>• Project management</li> <li>• Professional ethics</li> </ul>                                            | Effective interaction in interdisciplinary teams, coordination between institutions and informed decision-making in a complex environment. |

### 5.3. Integrated Nature of the Competency Model

The proposed competency model is based on the integration of four interrelated competency domains. Unlike traditional educational approaches, in which individual areas of education and training are often addressed separately, the proposed model emphasizes their interdependence and complementary nature.

Effective biological risk management requires specialists to understand biological processes, utilize advanced technologies, assess emerging threats, and work effectively in interdisciplinary environments. Accordingly, the four competency domains should be regarded as components of a unified system rather than as independent areas of education and training.

## 6. Practical Applications of the Proposed Competency Model

The proposed competency model provides a systematic framework for curriculum development by aligning education and training with contemporary professional requirements. Through the integration of the life sciences, digital technologies, risk management, and security studies, it supports the development of interdisciplinary competencies for addressing complex biological threats [2, 5, 28].

The principal differences between the traditional educational model and the proposed competency model are summarized in Table 3.

**Table 3:** Comparison between the Traditional Educational Model and the Proposed Competency Model

| Criterion                                                                                                   | Traditional Model                           | Proposed Competency Model                                                                              |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  Educational approach      | Discipline-based                            | Competency-based and interdisciplinary                                                                 |
|  Learning focus            | Knowledge acquisition                       | Competency development and application                                                                 |
|  Curriculum structure      | Separate academic disciplines               | Integrated competency domains                                                                          |
|  Technological preparation | Limited use of digital technologies         | Integration of artificial intelligence, bioinformatics, Big Data, digital twins, and digital platforms |
|  Security education        | Focus on traditional biological risks       | Integrated management of biological, cyber-biological, and hybrid risks                                |
|  Practical training        | Laboratory exercises and lectures           | Simulations, virtual laboratories, scenario-based learning, and digital learning environments          |
|  Assessment                | Knowledge assessment                        | Competency assessment and performance-based evaluation                                                 |
|  Professional readiness    | Preparation for specific professional roles | Adaptability, interdisciplinary collaboration, and lifelong learning                                   |

The model promotes adaptability and lifelong learning and can be applied across different educational levels and professional fields, including biological security, public health, crisis management, and national security [9]. Its implementation can be supported by contemporary educational technologies, such as virtual laboratories, digital simulations, artificial intelligence-assisted learning systems, and digital twin technologies, which facilitate scenario-based training and competency development in realistic learning environments [16, 17, 21, 22, 28].

## 7. Conclusion

This study demonstrates the need to modernize the education and training of biological security specialists in response to bioconvergence and accelerated technological transformation. It proposes an original competency model that integrates biological, technological, security, and social competencies within a unified conceptual framework aligned with contemporary professional requirements.

The proposed model provides a systematic basis for the development and revision of educational programmes while supporting competency development for professional practice in a dynamic and interdisciplinary security environment. It also offers a conceptual foundation for future empirical research aimed at validating the model and assessing its applicability across diverse educational and professional contexts.

## 8. References

- National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, *Biodefense in the Age of Synthetic Biology* (National Academies Press, Washington, DC, 2018).
- National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, *Safeguarding the Bioeconomy* (National Academies Press, Washington, DC, 2020).
- G.S. Koblenz, *Living Weapons: Biological Warfare and International Security* (Cornell University Press, Ithaca, NY, 2009).
- World Health Organization, *Global Guidance Framework for the Responsible Use of the Life Sciences* (WHO, Geneva, 2022).
- NATO Science and Technology Organization, *Biotechnology and Human Enhancement Technologies* (NATO STO, Brussels, 2020).
- European Commission, *2025 Strategic Foresight Report: Resilience 2.0 – Empowering the EU to Thrive amid Turbulence and Uncertainty* (European Commission, Brussels, 2025).
- UNESCO, *Recommendation on Open Science* (UNESCO, Paris, 2021).
- M.R. Endsley, Toward a Theory of Situation Awareness in Dynamic Systems. *Hum. Factors* **37**(1), 32–64 (1995).
- World Health Organization, *Health Systems for Health Security: A Framework for Developing Capacities for International Health Regulations, and Components in Health Systems and Other Sectors That Work in Synergy to Meet the Demands Imposed by Health Emergencies* (WHO, Geneva, 2021).
- A. Lele, *Disruptive Technologies for the Militaries and Security*, Smart Innovation, Systems and Technologies (Springer, Singapore, 2019).
- European Centre for Disease Prevention and Control, *Strategic Framework 2021–2027* (ECDC, Stockholm, 2021).
- U. Beck, *Risk Society: Towards a New Modernity* (SAGE Publications, London, 1992).
- D. Helbing, *Globally Networked Risks and How to Respond*. *Nature* **497**(7447), 51–59 (2013).
- NATO, *NATO 2022 Strategic Concept* (NATO Headquarters, Brussels, 2022).
- European Commission, *Horizon Europe Strategic Plan 2025–2027*. European Commission, Brussels, 2024.
- M. Coeckelbergh, *AI Ethics* (MIT Press, Cambridge, MA, 2020).
- World Health Organization, *Laboratory Biosafety Manual*, 4th edn. (WHO, Geneva, 2020).
- United Nations Office for Disarmament Affairs, *Biological Weapons Convention: Confidence-Building Measures* (UNODA, New York, 2023).
- European Parliament and the Council of the European Union, Regulation (EU) 2021/821 of 20 May 2021 Setting up a Union Regime for the Control of Exports, Brokering, Technical Assistance, Transit and Transfer of Dual-Use Items, *Off. J. Eur. Union* **L206**, 1–461 (2021).
- European Commission, *European Qualifications Framework for Lifelong Learning (EQF)* (Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2017).
- M. Giberna, H. Voos, P. Tavares et al., *On Digital Twins in Defense: Overview and Applications*. *J. Def. Model. Simul.: Appl., Methodol., Technol.* (2026).
- M.B. Okon, O.P. Ugwu, C.N. Ugwu et al., *From Pandemics to Preparedness: Harnessing AI, CRISPR, and Synthetic Biology to Counter Biosecurity Threats*. *Front. Public Health* **13**, 1711344 (2025).
- M. Bizova, *Competence, Competence Approach and Development of Competence Models*. *Pedagogika–Pedagogy* **88**(1), 119–137 (2016). ISSN 0861-3982 (Print), ISSN 1314-8540 (Online).
- T. Georgieva, Y. Yanakiev, *Stability in Dynamics: Diagnosing the Development of Some Key Components of Education at the Command and Staff Faculty during the Period 2000–2015*. In: Annual Military Scientific Conference of the Command and Staff Faculty “Contemporary Approaches to the Dynamic Management of Education and Training in Security and Defence,” 22–23 June 2016, Yearbook of the “G. S. Rakovski” National Defence College, Command and Staff Faculty, No. 1, Sofia, 68–81 (2016). ISSN 1312-2991.
- E. Shipochki, *Methodology for Studying the Dynamics of International Military Cooperation*. *Military Journal*, No. 4 (2025). pp. 28-38, ISSN 2534-8388
- M. I. Nenovska, *Risks to Biological Security Arising from the Interaction between Technologies and the Life Sciences*. In: Proceedings of the International Conference on Advanced Research and Technology for Defence (ARTDef 2023). Sofia, Bulgaria: Professor Tsvetan Lazarov Defence Institute, pp. III-138–III-145 (2023). ISSN 2815-2581.
- M. I. Nenovska, I. Radulov, From VUCA to BANI: Governing Dual-Use Biotechnologies through EU–NATO Civil–Military Interoperability. *International Conference Knowledge-Based Organization*, **32**(1), 223–230 (2026). DOI: 10.2478/kbo-2026-0026. ISSN 2451-3113.
- Daruka A., Nigam A., Kumar S. *Cyberbiosecurity in Action: Securing the Biological Battlespace from Digital Subversion*. – In: *Proceedings of the 21st International Conference on Cyber Warfare and Security (ICCWS 2026)*, pp. 726–734, 2026.



# Modular UAV Architectures in the Support of National Weapon Integration

István Papp, Bertold Békési

Ludovika University of Public Service, Budapest, Hungary

E-mail: papp.istvan@uni-nke.hu, bekési.bertold@uni-nke.hu

**Abstract:** This study addresses tactical and technological challenges of integrating indigenous weapon systems onto UAVs in asymmetric warfare. Closed-architecture platforms impose vendor lock-in, strategic vulnerabilities, and high lifecycle costs. To resolve this, the National UAV Modular Standard (NUMS) open framework decouples hardware from proprietary software. Featuring a Longitudinal Rail System for dynamic centre-of-gravity correction, an IP68 quick-disconnect interface, and a deterministic UAVCAN/Cyphal backbone on a secure, containerized Linux OS (Mil-UAV-OS), this architecture transforms technical modularity into operational agility. Modelling shows pairing commercial off-the-shelf (COTS) components with sovereign software decreases lifecycle costs while enhancing precision. Ultimately, this ecosystem shortens the "sensor-to-shooter" timeline, enabling near-real-time tactical responsiveness. It provides a strategic blueprint for the Hungarian Defence Forces to achieve technological sovereignty, converting rigid procurement into a dynamic defence ecosystem.

**Keywords:** UAV, MODULARITY, INTEGRATION, WARFARE, SOVEREIGNTY

## PART I: RESEARCH OVERVIEW & DOCTRINAL FRAMEWORK

### 1. Introduction: The Imperative of Paradigm Shift

In the history of warfare, few assets have exerted such a radical impact on tactical procedures as the emergence of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) at the beginning of the 21st century. Initially, the exclusive role of these platforms was reconnaissance (ISR – Intelligence, Surveillance, Reconnaissance); however, technological advancement and battlefield imperatives (e.g., Libya, Nagorno-Karabakh, Ukraine) have led to the mass employment of unmanned combat aerial vehicles (UCAVs) [1].

Within the framework of the Zrínyi Defense and Force Development Program, Hungarian force development has entered a phase where quantitative growth must be superseded by qualitative, innovation-driven integration. The relevance of this research is underscored by the fact that the rate of development in drone technology far outpaces traditional procurement cycles. A proprietary, closed-system armed drone purchased today may already be obsolete at the moment of its operational deployment due to dynamically evolving electronic warfare (EW) solutions. Therefore, the central premise of this research is dynamic capability building instead of static weapon procurement.

### 2. Profound Formulation of the Scientific Problem

The contradiction spanning between modern military doctrines and engineering realities manifests in three primary dimensions, which collectively constitute the scientific problem of this research:

- **Vendor Lock-in (Technological Captivity):** The overwhelming majority of currently available military weapon platforms feature closed architectures [3].
- **Strategic Vulnerability:** This implies that the user (e.g., the Hungarian Defence Forces) lacks access to the source code, cannot modify communication protocols, and cannot integrate indigenously developed weaponry or sensors, thereby creating strategic vulnerability.
- **The Cost-Effectiveness Paradox:** Precision strike capability is traditionally exceptionally expensive. The essence of the scientific problem is determining how a fundamentally inexpensive platform, constructed from commercial off-the-shelf (COTS) components, can be elevated to a level that satisfies military operational reliability and precision strike requirements without multiplying its cost.
- **Tactical Inflexibility:** Most armed UAVs are single-purpose assets: they either conduct reconnaissance or execute strikes. There is a lack of an intermediate, modular solution that would allow a unit commander to modularly configure ("lego together") the required capability on-site, depending on the nature of the mission.

**Core Problem Definition:** A systemic, open-source military architecture integrating modular hardware elements with indigenously developed software intelligence is absent, which

prevents establishing the foundations of a sovereign Hungarian drone strategy.

### 3. Detailed Elaboration of Hypothesis I: Modular Architecture as a Solution

**Hypothesis I:** Open-architecture, modular UAV platforms derived from domestic sources provide higher operational efficiency from both technical and economic perspectives compared to closed-system, foreign-manufactured military assets, as they enable dynamic capability development and logistical independence.

#### 3.1. Technical Resolution: The Concept of NUMS (National UAV Modular Standard)

To ensure that the hypothesis does not remain a mere theoretical proposition, the technical parameters must be established. Modular architecture signifies not merely interchangeable parts, but functional decomposition.

##### 3.1.1. Mechanical Modularity and Aerodynamic Flexibility

One of the greatest challenges for armed UAVs is the shifting center of gravity (CoG). A 2 kg high-explosive anti-tank (HEAT) charge or a 500-gram optical sensor radically alters flight characteristics. The solution lies in the application of a Longitudinal Rail System, along which the weapon attachment can move on a servo-controlled track. This enables in-flight center-of-gravity correction.

Furthermore, structural nodes – specifically the connection of arms and motors – are executed via IP68-rated bayonet locks. This ensures that an arm damaged by autocannon fire can be replaced within 60 seconds on the battlefield by a single soldier.

##### 3.1.2. Electronic and Data Transmission Architecture

The primary technical argument against closed systems is bus-level independence.

- **Data Bus:** The research proposes the UAVCAN V1 (Cyphal) protocol [8]. This is a redundant, deterministic network protocol where every component (node) possesses its own intelligence. If one electronic speed controller (ESC) is damaged, the system does not collapse; instead, the rest of the network isolates the fault.
- **Physical Interface:** For connecting modules, a universal, NATO-compatible multi-Port (power supply + Ethernet + CAN) must be applied. This enables any actor in the domestic defense industry (e.g., a software development company or an explosives factory) to develop a module featuring a standardized connector.

#### 3.2. Software Sovereignty: The Independence of the "Thinking Machine"

The software leg of the hypothesis relies on middleware-oriented development, addressing the root problem that foreign drone software operates as a "black box". The proposed solution involves the development of the Hungarian Defence Forces' own

encrypted Linux distribution (Mil-UAV-OS), operating on a ROS 2 (Robot Operating System) foundation [7].

Modularity within the software ensures that the autonomous flight algorithm, the target-recognition AI, and radio communication run in separate containers (Docker) [6]. If a frequency change is required due to enemy electronic jamming, only the communication module needs to be updated, while flight stability remains intact.

### 3.3. Economic Verification: Life Cycle Cost (LCC) Modelling

The research quantitatively proves that the modular system is economically more sustainable. Operational efficiency ( $E_{ops}$ ) can be calculated as follows:

$$E_{ops} = \frac{K_v \cdot P_s}{C_{total}} \quad (1)$$

Where  $K_v$  is the value of the destroyed enemy target (e.g., the value of a T-72 main battle tank),  $P_s$  is the probability of a successful hit (which increases due to modular, upgradeable sensors),  $C_{total}$  is the production and operational cost of the asset.

For closed systems,  $C_{total}$  increases exponentially due to foreign spare parts and licensing fees. Conversely, for the modular domestic system,  $C_{total}$  can be kept low because airframes can be replaced via 3D printing and motors can be sourced from COTS supplies. Consequently, operational efficiency ( $E_{ops}$ ) can be 5 to 10 times higher than that of conventional systems.

### 3.4. Tactical Flexibility and the "Sensor-to-Shooter" Chain

The tactical challenge is that too much time elapses between target identification and destruction. The hypothesis resolves this by utilizing the modular drone simultaneously as a sensor. The sub-unit commander does not "request support" but rather "swaps capabilities". If the reconnaissance module detects enemy armor, the drone returns, receives the anti-armor module within 2 minutes, and flies back to the coordinates. This organic integration radically shortens reaction time.

## 4. Summary Conclusions for the Verification of Hypothesis I.

Based on the presented data and the technical-logical chain, the proposed solution for Hypothesis I is comprehensive. The modular architecture is not merely a technical choice, but a doctrinal response to the asymmetry of modern warfare. The pillars of the solution are summarized as follows:

- **Physical Standardization:** Eliminates mechanical incompatibility between domestic weaponry and the carrier platform.
- **Digital Openness:** Enables the integration of domestic cryptographic solutions and AI algorithms without foreign intervention.
- **Cost-Effective Mass Employability:** The modular design permits a "consumable asset" mindset, where the loss of a platform does not cause a financial catastrophe.
- **Logistical Autonomy:** The domestic industrial base of the Hungarian Defence Forces will be capable of repair and development, independent of disruptions in global supply chains.

**Closing Thought:** The resolution of the scientific problem is therefore not the creation of a perfect drone, but the establishment of a perfect framework capable of accommodating future technologies. This modular approach guarantees that the UAV capability of the Hungarian Defence Forces does not represent a static purchase, but rather a continuously evolving, sovereign defense ecosystem.

**Next Step:** As a continuation of the doctoral dissertation, I propose the development of Hypothesis II, which – building on the modular hardware presented above – investigates the role of artificial intelligence in autonomous terminal phase guidance and defense against electronic warfare.

## PART II: DOCTORAL RESEARCH STUDY – DETAILED TECHNICAL AND TACTICAL ANALYSIS

### Technical and Tactical Challenges of Applying Unmanned Aerial Vehicles as Weapon Platforms

#### 1. Introduction: The Imperative of Paradigm Shift on the Modern Battlefield

In the history of military science, technological leaps frequently force a complete reconsideration of doctrines. Today, the integration of unmanned aerial vehicles (UAVs) into kinetic operations does not merely signify the emergence of a new branch of arms, but rather the fusion of network-centric warfare (NCW) and non-line-of-sight strike capabilities. Modern asymmetric and symmetric conflicts (e.g., lessons from the Ukrainian theater) have highlighted that rigid assets with slow development cycles perish against dynamically adapting, software-driven solutions [2]. The objective of this research is to outline a framework that transforms technical modularity into tactical flexibility.

#### 2. Extended Formulation of the Scientific Problem

The root of the scientific problem lies at the intersection of technological asymmetry and economic sustainability. It manifests in the following domains:

- **Technical-Cognitive Limitation:** Current weapon integration processes are overly specific; the integration of a single weapon type onto a given carrier requires years of engineering work, which is unacceptable on the battlefield [4].
- **Systemic Vulnerability:** Closed-source and proprietary architecture systems operate as "black boxes," preventing the implementation of national cybersecurity and electronic defense protocols.
- **Tactical Rigidity:** The specialization of platforms (multirotor FPV vs. fixed-wing loitering munition) hinders universal sub-unit level application, increasing the logistical footprint and training burdens.

#### 3. In-Depth Elaboration of Hypothesis I: The Modular Ecosystem as a Strategic Solution

**Hypothesis I:** Open-architecture, modular UAV platforms derived from domestic sources provide higher operational efficiency from both technical and economic perspectives compared to closed-system, foreign-manufactured military assets, as they enable dynamic capability development and logistical independence.

##### 3.1. Mechanical and Structural Modularity: The Adaptive Airframe

One of the fundamental challenges in military engineering sciences is maintaining the equilibrium between payload and flight stability.

##### 3.1.1. Universal Attachment Protocol (UAP)

The research proposes a rail system containing payload suspension points shiftable along the longitudinal axis of the aircraft. This ensures that the center of gravity of the weaponry (e.g., a 40mm high-explosive fragmentation grenade or a guided shaped charge) always coincides with the center of lift of the aircraft.

##### 3.1.2. Quick-Disconnect Propulsion Modules

Modular arms do not merely facilitate repair, but also enable alteration of power density. In the case of a heavier weapon module, the arms can be exchanged for higher-torque motors and larger diameter propellers without requiring the replacement of the central flight control unit.



### 3.2. Avionics and Data Transmission Modularity: The Digital Backbone

The most critical layer of modularity is communication. This research breaks away from traditional analog video and PWM control architectures.

#### 3.2.1. Deterministic Data Transmission

The application of the UAVCAN (Cyphal) bus system ensures that the weapon release command arrives within a guaranteed time slot (jitter-free), eliminating accidental software-triggered activation.

#### 3.2.2. Software-Defined Radio (SDR) Integration

The modular RF (radio frequency) unit allows for the battlefield parameterization of frequency-hopping (FHSS) algorithms. If the enemy employs adaptive jamming, the software profile (waveform) of the modular radio can be instantly swapped, preserving the command data link.

### 3.3. Software Modularity: "App-Based" Weapon Control

The scientific novelty lies in the containerization of the software architecture.

#### 3.3.1. Abstraction Layers

The flight controller is solely responsible for physical stability. All tactical functions (target tracking, ballistic calculations, target prioritization) run as independent software modules on the onboard AI processor [10].

#### 3.3.2. Sensor-Fusion Flexibility

The modular interface allows the drone to utilize daylight optical, thermal imaging, or even passive electronic intelligence (ELINT) modules [5]. The AI algorithm is "sensor-agnostic," enabling it to generate target coordinates from any input data.

### 3.4. Logistical and Economic Aspects: Verification of the "Sovereign Supply Chain"

From the perspective of military economics, the life-cycle cost (LCC) of a modular system is radically more favorable.

#### 3.4.1. Inventory Optimization

There is no need to stockpile multiple drone types; a universal platform and its corresponding specific modules are sufficient.

#### 3.4.2. Domestic Industry Development

By establishing the modular standard (NUMS), the domestic SME sector becomes capable of developing specific sub-modules (e.g., custom battery packs or specialized fuze mechanisms), eliminating dependency on foreign suppliers.

## 4. Summary: The Building Blocks of Future Warfare

The modular UAV architecture presented in this research is not merely a technical solution for weapon integration, but the foundation of operational adaptability. The verification of Hypothesis I highlighted that the answer to the unpredictability of the modern battlefield is not a "perfect" weapon system, but an "adaptable" one. The modular approach resolves the centuries-old contradiction between cost-effectiveness and precision: mass-produced, inexpensive carrier platforms are elevated to military-grade standards by domestic software intelligence and interchangeable weapon modules.

This "Digital Lego" concept enables the Hungarian Defence Forces to act as a trendsetter rather than a follower in the technological race. In conclusion, future wars will not be won by those possessing the most expensive weapons, but by those capable of adapting their software and hardware most rapidly to the

changing threat landscape. Therefore, the modular UAV platform is not merely an asset, but the guarantee of our technological sovereignty and tactical superiority, blending engineering precision with battlefield necessity. Through this framework, the "sensor-to-shooter" chain is not only shortened but becomes near-real-time, establishing the foundation for next-generation autonomous operations [9].

In conclusion, it must be noted that the implications of drone technology extend far beyond military applications, promising revolutionary advancements in industries, disaster response, healthcare accessibility, and sustainable environmental practices. As we navigate the complex landscape of unmanned aerial systems, collaborative research efforts, inter-disciplinary approaches, and a nuanced understanding of ethical and societal implications will be paramount in unlocking the full potential of the drone technology for both of military and the civilian objectives [11].

## References

1. Mojtaba Nasehi (2025). FPV Drone Swarms in Asymmetric Warfare: Tactical Innovations and Ethical Challenges. *Advances, Volume 6, Issue 3, September 2025*. DOI: 10.11648/j.advances.20250603.12.
2. Ji-Jen Hwang (2026). Reassessing Biddle's Modern System: Data-linked kill chains, advanced algorithms, and the evolution of combined arms warfare in the Russo-Ukrainian war. *Defense Studies, Routledge, Taylor & Francis Group 42(1), 1-20*. <https://doi.org/10.1080/14702436.2026.2672089>.
3. Plonsky, J. D.; Herber, D. R. (2025). Integrating agile systems engineering and modular open systems approach (MOSA): A novel methodology for space and defense systems. *Colorado State University Open Repository*. [https://www.engr.colostate.edu/~drherber/files/Plonsky2025a\\_presentation.pdf](https://www.engr.colostate.edu/~drherber/files/Plonsky2025a_presentation.pdf).
4. William B.; Patrick G.; Robert O. (2003). Weapon System Open Architecture (WSOA) Avionics Development. *American Institute of Aeronautics and Astronautics, Modeling and Simulation Technologies Conference and Exhibit, 5690*. <https://doi.org/10.2514/6.2003-5690>.
5. Andres, L. M.; Camilo, L. et al. (2026). Design and field validation of a modular vision-guided UAV system for real-time adaptive vegetative restoration. *Drones, 10(5), 379*. <https://doi.org/10.3390/drones10050379>.
6. Zhang, J., TIERS Lab. (2025). Enhancing the resilience of ROS 2-based multi-robot systems with Kubernetes: A case study on UWB-based relative positioning. *Sensors, 25(16), 5067*. <https://doi.org/10.3390/s25165067>.
7. Sergio S. (2018). Cyber security testing of the Robot Operating System in unmanned aerial systems. *Defense Technical Information Center Technical Report (AD1065502)*. <https://apps.dtic.mil/sti/trecms/pdf/AD1065502.pdf>.
8. OpenCyphal Consortium. (2025). Cyphal, Specification v1.0 *OpenCyphal Project*. [http://specification.opencyphal.org/Cyphal\\_Specification.pdf](http://specification.opencyphal.org/Cyphal_Specification.pdf).
9. Shen-yang S.; Yi B.; Hao H. (2024). Design and research of cooperative command system for multi-domain unmanned vehicle joint operations. *SPIE Digital Library, Proceedings of SPIE, 13037, 130371A*. <https://doi.org/10.1117/12.3037982>.
10. Michael J. B. (2026). By algorithm or order: Integrating lethal autonomous weapon systems into targeting. *Military Review, Online Exclusive (Army University Press), 1-15*. <https://www.armyupress.army.mil/Journals/Military-Review/Online-Exclusive/2026-OLE/Algorithm-or-Order/>.
11. Timea Vas et. al. (2023). Comprehensive Study of Military and Civil Drone Applications: Assessing Key Areas of Significance and Future Prospects. *Repüléstudományi Közlemények (1997-től) 35 : 3 pp. 149-170. , 22 p. (2023)*. DOI: 10.32560/rk.2023.3.10.

# Features in the design of unmanned aerial vehicles aircraft type

Sabi S Minev

Higher Air Force School „G. Benkovski“ - Dolna Mitropolia, Bulgaria,

E-mail: subi.minev@abv.bg

**Abstract:** *The use of aircraft-type unmanned aerial vehicles (UAVaircraft type) in modern combat operations is considered. Basic temporary criteria for the production and operation of aircraft-type UAVs are defined. Using the similarity method, a determination of the mass of aircraft-type UAVs is proposed. A variant is proposed related to the calculation of the mass of the fuselage of certain aircraft-type UAV models. The difference in the use of retractable or fixed landing gear of aircraft-type UAV types in their operation is determined. Recommendations are made for noise reduction during UAV operation. The economic aspects of aircraft-type UAV design are touched upon.*

**KEYWORDS:** UNMANNED AERIAL VEHICLE AIRCRAFT TYPE, UAV CLASSIFICATION, CRITERIA, DETERMINATION OF UAV MASS.

## 1. Introduction.

Unmanned aerial vehicles of the aircraft type UAV are designed to achieve significant results in terms of: flight distance, speed and altitude. The methods and means, as well as the data from the research conducted, with the help of which these results are achieved in practice, are used in the further design of other classes of UAV. Recently, various new schemes and components of this class of UAV aircraft type have also been created for experimental purposes and for testing. The experiments are also aimed at testing and refining new systems related to their controls, aerodynamics, materials for manufacturing, where experimental material is accumulated for the creation of new, more advanced UAVaircraft type. Large unmanned aerial vehicles of the aircraft type are equipped with engines usually with power (55 ... 100 horsepower), providing significant independence for their use, in particular for independent takeoff and a set of heights for maneuvering and, of course, landing [5]. Possessing high aerodynamic properties, this type of UAV has changed the spectrum of their use in recent years. And as examples, some characteristics of existing aircraft-type UAV will be considered.

### 1.2. Example characteristics of existing aircraft-type UAV aircraft type

The Ukrainian unmanned aerial vehicle of the aircraft type "Lyuty" is a low-wing aircraft with a propeller located in the rear part of the fuselage. The fuselage is made of fiberglass with metal reinforcement, which makes the structure both light and durable. The main technical parameters of this aircraft-type UAV aircraft type are:

- a. Length: 4.4 meters;
- b. Wingspan: 6.7 meters;
- c. Take-off weight: 200 kilograms or more;
- d. Engine power: 50 horsepower;
- e. Range: up to 1,500 kilometers;
- f. Combat load: 50-75 kilograms.

The engine of the specified UAV is a German Hirth F-23 gasoline engine. The three-blade propeller is located in the rear part of the fuselage. The modular design allows for easy disassembly for transportation [6].

Examples of the specified class of aircraft-type UAVs that are widely used in practice include: UAV - Elbit Hermes 450; The single-engine version 450S, using a 70 hp "R902(W)" rotary-piston engine; The "Orion" unmanned aerial vehicle; All prototypes use a 115 hp "Rotax 914" engine, etc [9].

## 2. Statement of the problem

The main requirement for aircraft-type UAV aircraft type is the ability to be modular in design with the use of lightweight construction materials, cheap in production and flexibility and adequacy in performing the tasks set. In addition, the design and manufacture of this class of UAV aircraft type must take into account the dynamics of innovations, which undergo changes over a period of 3 to 6 months. In general, changes in the use of this class of UAV aircraft type in recent times are associated with the widespread use of artificial intelligence in their operation. To ensure

the adequacy of new UAV developments and the trends arising from changes in their operation, it is not necessary to introduce some criteria for the manufacture and operation of aircraft-type UAVs.

## 3. Criteria set for the production and operation of aircraft-type UAV aircraft type.

When developing a hierarchy of criteria and integrating them into a single system, the following requirements are taken into account [10]:

- 1) the criteria must be adequate for the goals and objectives of using aircraft-type UAVaircraft type;
- 2) the hierarchy of criteria must follow from the hierarchy of goals for using UAV aircraft type, taking into account possible changes on the battlefield;
- 3) the factors determining the design of the unmanned aerial vehicle and its subsystems must be fully taken into account;
- 4) specific indicators must not contradict the general (integral) criterion;
- 5) the criterion must be clear and, if possible, easy to define.

The specified requirements for the criteria (1-5) must allow for the possible definition of the qualities and subsequent use of UAV aircraft type through one integral criterion setting the optimality of this type of UAV [10].

## 4. Main criteria for aircraft-type UAV aircraft type

When developing an aircraft-type unmanned aerial vehicle, numerous characteristics, parameters and performance indicators, as well as limitations for its operation, are taken into account. The following criteria should be noted [6]:

1. Aerodynamic efficiency –  $K_{opt}^{eff}$ . Minimizing total drag with a fixed lift coefficient is an important criterion as it directly affects flight endurance.
2. Structural weight –  $K_{min}^m$ . Reducing weight while maintaining stiffness and strength is the goal of optimization, often achieved by removing material from non-load-bearing areas.
3. Features of the engine installation –  $K_{opt}^{eng}$ . Propeller type, intake air characteristics, nozzles, fuel type and relative mass of powerplant and fuel.
4. Payload parameters –  $K_{max}^m$ . Possibility of placing specific and large equipment (e.g. cameras, radar stations, sensors).
5. Accuracy and reliability –  $K_{max}^s$ . Performance-related indicators (e.g. probability of recognition of reconnaissance targets, detection range of airborne radar).
6. Structural safety –  $K_{max}^{sek}$ . Passive safety (e.g. protective elements on the blades of the power plant) and compliance with structural reliability requirements.
7. Economic indicators –  $K_{min}^{ec}$ . Minimum costs with optimal technical parameters.

The specified criteria can, with some approximation, be expressed by an integral criterion  $K_{UAV}^{int}$  of the form:

$$(1) \quad K_{UAV}^{int} = (K_{opt}^{eff}, K_{min}^m, K_{opt}^{eng}, K_{max}^m, K_{max}^s, K_{max}^{sek}, K_{min}^{ec}) \rightarrow \text{optimally}$$

## 5. Design features of aircraft-type UAV aircraft type

We will consider specific technical ideas (concepts) aimed at improving flight characteristics, primarily takeoff and landing characteristics, as well as reducing fuel consumption and noise levels of aircraft-type UAV aircraft type. Some of these ideas have been tested in practice, while others are not yet generally accepted. For example, in the design and manufacture of this type of UAV aircraft type, a wing profile is used that allows operation at relatively low subsonic and transonic flight speeds [5],[6].

A common configuration among aircraft-type unmanned aerial vehicles is the aerodynamic configuration with two tail sections located at an angle of 120 degrees. This configuration is most often used when placing a pusher propeller behind the fuselage and it has the smallest inductive resistance of 3% compared to the total. The V-shaped tail section also creates a closed power circuit of the fuselage, which provides very high strength of the entire structure. The specified configuration is also often used in large aircraft-type unmanned aerial vehicles. A variant of the aircraft-type UAV with a V-shaped tail is presented in Fig. 1



Fig. 1. UAV aircraft type V-shaped tail section

The most suitable NASA wing profile for an unmanned aerial vehicle UAV aircraft type depends entirely on its purpose, speed and expected payload. Usually aircraft type UAVs fly at a lower speed, which changes the flow of the wing. For them, NASA develops optimized low-speed geometries, for example, the NACA 2412 wing profile. An extremely popular profile that offers a great balance between low drag and good payload. In addition, NACA 0012 and NACA 0015 profiles are also used. Additionally, other wing profiles are experimented with and used in practice [5].

The conducted aerodynamic simulation of the NACA 0012 profile of an aircraft type UAV at a speed of 110 to 150 km/h and the obtained specific characteristics from it are presented in Fig. 2.

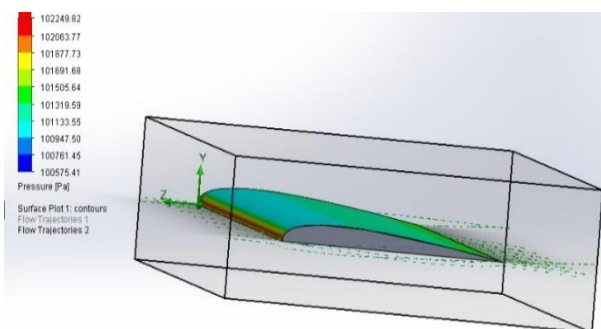


Fig. 2. Aerodynamic characteristics of a NACA 0012 profile of an aircraft-type UAV aircraft type at a speed of 110 to 150 km/h.

## 6. Determining the mass of an aircraft-type UAV aircraft type

An important characteristic of each type of UAV is its take-off mass. Usually, when designing a UAV aircraft type, the mass is determined by successive approximations. The first approximation

in determining the mass is carried out at the stage of preliminary design (technical proposal), and the second and, if necessary, subsequent approximations, when it is necessary to select materials and equipment, are made during the conceptual design. Below we consider determining the mass of an aircraft-type UAV (in kg) at takeoff in  $G_0$  first and second approximation.

### 6.1. Calculation of the take-off mass of an aircraft-type UAV in the first approximation

In the Russian-language literature, the dependence for determining the mass of aircraft is presented [1].

From the equation for the balance of the mass of an aircraft-type UAV in relative units, relative weight, relative weight and relative parts.

$$(2) \quad 1 = G_{str} + G_{c\_eqm} + G_1 + \frac{1}{G_0} (G_{eng} + G_{c\_load} + G_{add\_eq})$$

Where:  $G_{str}$  - structure mass construction;  $G_{c\_eqm}$  - mass control equipment;  $G_0$  - mass UAV takeoff weight;  $G_{c\_load}$  - combat load;  $G_{add\_eq}$  - mass additional equipment;  $G_{eng}$  - mass engine installation;  $G_1$  - mass important unit.

After a minor transformation in (2) we obtain, at the initial moment, to a first approximation, the relative value of the mass of an aircraft-type UAV  $G_0$  by component parts at takeoff, namely:

$$(3) \quad G_0 = \frac{G_{eng} + G_{c\_load} + G_{add\_eq}}{G_{str} + G_{c\_eqm} + G_1 - 1}$$

We assume in (3) that the engine type and the mass of the propulsion system -  $G_{eng}$ , as well as the masses of the combat payload -  $G_{c\_load}$  and additional equipment  $G_{add\_eq}$  - are known or given. And the remaining relative masses of the structure, equipment and control system are taken as relative average values from existing models, which are presented in Table 1.

### 6.2. Relative values of the masses of the structure, equipment and control system of an aircraft-type UAV (variant)

Table 1. Relative masses of the structure, equipment and control system of an aircraft-type UAV

| N number | Name of the mass of the UAV structure             | UAV,s structure mass limits |
|----------|---------------------------------------------------|-----------------------------|
| 1        | G <sub>str</sub> - structure mass construction    | 0,38...0,42                 |
| 2        | G(c <sub>eqm</sub> ) - mass control equipment     | 0,09...0,12                 |
| 3        | G <sub>(c<sub>load</sub>)</sub> - combat load     | 0,10...0,15                 |
| 4        | G(add <sub>eq</sub> ) - mass additional equipment | 0,09...0,12                 |
| 5        | G <sub>eng</sub> - mass engine installation       | 0,21...0,24                 |
| 6        | G <sub>1</sub> - mass important unit              | 0,04...0,08                 |

The specified relative mass values in an aircraft-type UAV, determining the take-off mass value  $G_0$  we will demonstrate with the following example. For this purpose, the average relative values of the data presented in Table 1 have been selected [6]. In this case, we have:

$$(4) \quad G_0 = - \frac{0,22+0,11+0,1}{0,41+0,1+0,06-1} \quad \text{where } G_0 = 1,000$$

The relative average values of the masses constituting an aircraft-type UAV presented in (4) are of a balance nature. Any change in the relative values of the masses implies a change in other changes in the quantities included in equation (4). The assumed relative value of  $G_0 = 1,00$  In UAV design practice, priority is determined by the relative values:  $G_{eng}$  - mass engine installation and  $G_{c\_load}$  - combat load. Variant with relative value of  $G_{eng} = 0,21...0,24$  and  $G_{c\_load} = 0,10...0,15$  Table 1 shows the relative values of  $G_0$  from (4) we obtain the dependence [1]:

$$(5) \quad G_0 = 2,32558G_{eng} + 2,32558G_{cload} + 0,232558$$

The relative values of  $G_0$  are presented in Fig. 3

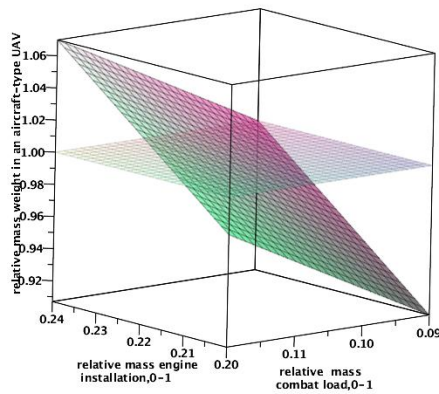


Figure 3. Dependence of  $G_0$  on the relative weight of  $G_{eng}$  - mass engine installation and  $G_{load}$  - combat load in an aircraft-type UAV, s.

### 6.3. Mass of the main elements making up the structure of an aircraft-type UAV aircraft type

It is known that the mass of the main elements in the construction of an aircraft-type UAV aircraft type is determined by the masses of the wing, fuselage, tail and chassis. The total value of the mass is determined by the dependence:

$$(6) \quad G_{srt} = G_{wing} + G_{fus} + G_{supp} + G_{chas}$$

Where:  $G_{srt}$  - structure mass construction UAV, kg;  $G_{wing}$  - UAV, s wing mass, kg;  $G_{fus}$  - UAV fuselage mass, kg;  $G_{supp}$  - mass of the supports in the UAV, kg;  $G_{chas}$  - UAV chassis mass, kg

One of the significant parts of the mass of an aircraft-type UAV structure is the mass of the fuselage -  $G_{fus}$  UAV fuselage mass, kg. Its value can be determined by the dependence:

$$(7) \quad G_{fus} = 1,14 \kappa_{eng} (1 + 0,4 k_{pres}) L_{fus}^{1,5} G_0^{\frac{1}{4}}$$

Where:  $\kappa_{eng}$  - engine installation coefficient ( $\kappa_{eng} = 1,14$  - if the engines are mounted on the fuselage);  $k_{pres}$  - coefficient of maximum operating altitude,  $Pa_{alt}$  for an altitude of 1000 meters;  $L_{fus}$  - fuselage length, meters;  $G_0$  - mass UAV takeoff weight, kg

With average dimensions for the given class of UAV aircraft type:  $\kappa_{eng} = 1,14$ ,  $k_{pres} = 0,7..0,8$ ,  $L_{fus} = 4,4 \dots 5,6m$   $G_0 = 180 \dots 230kg$  by dependence (7) the mass of the fuselage  $G_{fus}$  it turns out:

$$(8) \quad G_{fus} = 1,715472 L_{fus}^{1,5} G_0^{\frac{1}{4}}$$

The dependence given by (7) and presented in (8) on the average values of existing UAV aircraft type, the mass of the fuselage  $G_{fus}$  is demonstrated in Fig.4.

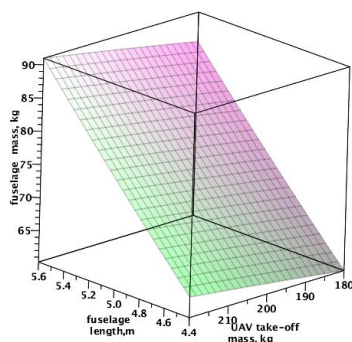


Fig. 4. Mass of the fuselage  $G_{fus}$  of an aircraft-type UAV under average conditions  $\kappa_{eng} = 1,14$ ,  $k_{pres} = 0,7..0,8$ ,  $L_{fus} = 4,4 \dots 5,6m$   $G_0 = 180 \dots 230kg$ .

The figure presented in Fig. 4 shows that Mass of the fuselage is within limits  $G_{fus} = 85..110 kg$  of the total mass of the aircraft-type UAV  $G_0 = 180 \dots 230kg$ .

The results obtained from the calculation of the fuselage mass according to and presented specifically in [1] show that these dependences provide acceptable accuracy for the design of aircraft-type UAVs, accompanied by a standard error of about 2-5%. The distribution of some of the masses of the individual elements expressed in percentages, making up the fuselage mass, are presented in Table 2.

Table 2. The distribution of some of the masses of the individual elements expressed as percentages of the fuselage mass

| N number | name of individual elements of a UAV | mass of individual fuselage elements expressed in percentages |
|----------|--------------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| 1        | UAV skin                             | 30...35                                                       |
| 2        | stringers and spars                  | 15...25                                                       |
| 3        | barriers and joints                  | 10...15                                                       |
| 4        | hatches for UAV equipment            | 9...12                                                        |
| 5        | UAV seals and fasteners              | 6...9                                                         |
| 6        | other fuselage elements              | 3...6                                                         |

The results in Table 2. show that the skin, stringers and frames account for 60–65% of the mass of the fuselages of aircraft-type UAVs. The significant relative mass of the specified elements compared to the total of the fuselage suggests the search for solutions to reduce it. Such solutions in modern conditions require the use of new materials in the fuselage construction, which can lead to a weight reduction of 15...20%. For example, the use of a “honeycomb” structure using fiberglass or carbon fibers (polymer paper honeycombs with dimensions of 9-10 mm). This structure has a surface density of about 3 kg/m<sup>2</sup>, and a three-layer panel of fiberglass or carbon fibers in combination with other dense materials such as plywood has a surface density of 4.5 kg/m<sup>2</sup>, i.e. 1.5 times greater.

### 8. Design measures for noise limitations during flight of aircraft-type UAV aircraft type

The practical operation of aircraft-type UAV aircraft type implies a system of measures to limit noise when flying over a given territory. Over time, these restrictions are becoming more and more stringent [7]. Currently, for example, it is required that the noise during the cruising flight of an aircraft-type UAV at a distance of up to 3.5 km from the earth's water surface should not exceed 93 dB, and when landing, the noise should not exceed 102 dB.

### 9. Economic aspects in the design and manufacture of aircraft-type UAVs

The introduction of new materials in the design of aircraft-type UAV aircraft type implies a continuous reduction in the costs of their manufacture, which are:

- Reducing the number of structural elements and joints;
- Simplifying the external shapes of the components (surfaces, ribs, stringers, etc.);
- Creating aircraft-type UAV aircraft type through modeling prototypes.

To implement the indicated directions, forecasting of the financial management of a given type of research and production structure related to the design of aircraft-type UAV aircraft type is applied. The dynamics of the development and modernization of UAV aircraft type over time applies time series. For a more detailed study of time series in financial management, probabilistic-statistical models are used as a priority. In this case, the time series  $Bp(t)$  is considered as a random process (with discrete time) for the movement of financial quantities, for example in particular - timeliness of UAV aircraft type production, granting of loans, etc [4]. For measuring the activity of the financial structure  $Fin(t)$  in

chronological order  $Bp(t)$  mathematical expectation is used  $M_{mat\ expect}$  of the state, the "movement" of financial investments, on the dependence [3]:

$$(9) \quad Fin(t) = M_{mat\ expect} Bp(t)$$

In applied research in financial management, time series models are considered and applied, with stationary models being the first. In them, the joint distribution functions for an arbitrary number of time moments  $k$  of the dynamic series, for example, investments, financial receipts, interest for the design and production of aircraft-type UAV aircraft type, change over time. In this case, the fluctuation of the mathematical expectation should be predicted with sufficient accuracy..

## 10. Lockdown

The considered features in the design of aircraft-type UAV aircraft type are determined by the dynamics of their use in practice by formations. The factors influencing the choice of a specific design scheme in the context of the purpose of the future unmanned aerial vehicle are also analyzed. Based on this analysis, a number of criteria have been formulated that allow focusing the process on accelerating the design in a short time. This is achieved by calculating the take-off mass of the aircraft-type UAV aircraft type, the mass of the fuselage, as well as the values of the masses of the structure, equipment and the control system of the aircraft-type UAV. Additionally, the distribution of some of the masses of the individual elements expressed in percentages, making up the mass of the fuselage, was determined. The economic aspects of the design of aircraft-type UAV aircraft type were also touched upon. The proposed approach to the preliminary design of unmanned aerial vehicles has some incompleteness, but I hope that it can serve as a basis for subsequent development by other UAV specialists.

## Literature

1. Badagin A, Muhamedov F.A. Konstruktion von Leichtflugzeugen M. Maschinenbau, 1978-2028 S..
2. Ivanov M. V. E-mail: str412mam@mail.ru, Moscow State Technical University named after N. E. 2005.
3. Krasilshchikova M.N., Sebyakova G.G., Management and guidance of unmanned maneuverable aerial vehicles based on modern information technologies, Fizmatlit, 2003.
4. Mineva S.K., Research and increasing the effectiveness of the financial management of modern organizations, V. Levski National University, V. Tarnovo, (2025).
5. Moiseev V.S., Saleev A.B. Main directions of development of unmanned aviation complexes on the basis of piloted prototypes of aviation technology developed for the state, Aerospace technologies and equipment (AKTO-2006). Materials of the international scientific and technical conference. - Kazan: Kazan Publishing House. Mr. technical University, 2006. - P. 60-62.
6. Fundamentals of design, construction and manufacturing of aircraft (remotely piloted aircraft). In order. I.S. Golubeva and Yu.I. Yanke-vicha. - Moscow: MAI Publishing House, 2006. - 528 p.
7. Kanchev, N., Application of fused deposition modeling approach for 3d printing in the design and manufacturing of small unmanned aerial vehicles. aeronautical research and development, Volume 3, 2024 "Georgi Benkovski" Bulgarian Air Force Academy, стр. 85-96, p-ISSN 2815-293X, e-ISSN 2815-2948
8. Stratton R.A., Corlson N.L. Fiber wall damage during bond failure, Nordic Pulp Paper Res. J. 1993. N2. Pp. 245-249.
9. [https://ru.ruwiki.ru/wiki/?utm\\_referrer=https://yandex.ru/](https://ru.ruwiki.ru/wiki/?utm_referrer=https://yandex.ru/)
- 15.04.2026
10. <https://yandex.ru/search/?> 18=.05.2026



# Characteristics of the materials used in the design of unmanned aircraft type

Sabi S Minev

Higher Air Force School „G. Benkovski“ - Dolna Mitropolia, Bulgaria,

E-mail: subi.minev@abv.bg

**Abstract:** The use of aircraft-type unmanned aerial vehicles (UAVs) is considered. The advantages, disadvantages and limitations of specific configurations of the UAV body are described. The requirements for simultaneous assessment of materials are described, with an emphasis on modern composite materials forming structurally reinforced or three-layer structures of some UAV elements. It is proposed to take the mass efficiency coefficient of the model as a basis for comparison of aircraft-type UAVs, which determines what part of the mass of the considered design corresponds to the requirements of users. A static analysis of the fuselage and wings of aircraft-type UAVs, made with new materials, was carried out, determining the parameters and their shapes in order to reduce the bending moment acting on the structural elements of the wing, which would reduce its weight. Safety coefficients for the operation of aircraft-type UAVs with certain materials and the financial situation in their design based on forecasting time series of changes in the requirements for the use of UAVs are proposed.

**KEYWORDS:** UNMANNED AERIAL VEHICLE AIRCRAFT TYPE, UAV CLASSIFICATION, MATERIALS, UAV HEALTH.

## 1. Introduction.

Today, unmanned aerial vehicles (UAVs) are widely used in many areas of human activity. Especially in the last few decades, this technology has moved from the military or other areas to something practical and ubiquitous in human activity. Using new directions, especially in military practice, unmanned aerial vehicles are gaining more and more functionality, sometimes requiring designers to make bold decisions rarely seen in "big" manned aviation. This article reviews the current state of unmanned aircraft-type aircraft, focusing on the materials used for the design and construction of UAVs. It analyzes the main materials underlying the choice of a specific aerodynamic configuration of the UAV during the design phase. Particular attention is paid to the advantages, disadvantages and limitations of specific configurations of the UAV body, and structural materials are considered in the context of potential UAV application scenarios [6]. Based on a summary of the analyzed parameters, a number of classification criteria have been identified, which can subsequently be used as the basis for a comprehensive classification of a wide range of unmanned aerial vehicles.

## 2. Statement of the problem

The main disadvantage of fixed-wing unmanned aerial vehicles (UAVs) is the need for additional measures for take-off and landing. In addition, most unmanned aerial vehicles are characterized by a variety of linear dimensions, which inevitably leaves its mark on their flight characteristics and control characteristics. The need to use a variety of materials for the manufacture of UAVs is dictated by their mass use and compliance with the principle of "cost-effectiveness"[5].

## 3. Materials for making an aircraft-type UAV

The efficiency of the design and selected structures of the UAV are determined by a simultaneous assessment of the materials that can be used. The most commonly used materials include:

1. Materials made of beryllium materials, followed by boroplastics and finally carbon plastics.

2. The greatest mass efficiency can be achieved with three-layer structures and slightly less with wafer structures.

3. The use of modern composite materials is recommended for reinforced or three-layer structures [1].

Unreinforced single-layer skins made of the most efficient materials such as boroplastics and carbon plastics are practically equivalent in mass to reinforced aluminum or magnesium.

The shape of non-essential parts and their mutual coordination are established in general terms. An effective layout solution can be achieved by the following measures:

1. Reducing the dimensions of the structure, increasing the density of the layout.

2. Selection of the most rational solutions for the layout of the compartment as a whole, as well as its individual elements, which, when evaluating the options, are arranged in sequence to increase their efficiency.

3. Selection of rational proportions of the shapes of the parts.

4. Combining several power functions of the fuselage in one part. This allows to reduce the weight, and in some cases the dimensions of the nodes.

5. Selection of the most effective design solutions.

### 3.1. Features of thin-walled structures of the elements making up the UAV hull

All materials used in the design and construction of UAVs are thin-walled structures. For thin-walled structures, the choice of the most effective design of the envelope wall is of fundamental importance, since the final version determines the overall scheme of the UAV and the characteristics of its production. As a rule, when establishing one or another option, technological restrictions come into force. Possible design options are arranged in order of increasing weight efficiency (reinforced, waffle, three-layer). Depending on the model of the walls, the following skins are mainly used on the fuselage and wings: single-layer unreinforced, two-layer, reinforced with frames or simultaneously with frames and stringers, waffle and three-layer. Combined options are also possible. For example, intermediate frames can be additionally installed on waffle or three-layer skins. Two-layer claddings are usually used to meet strength requirements, with the supporting base being a layer made of structural material (composite or metal). The choice of one or the other option is determined by mass constraints, operating conditions, and the nature and magnitude of the acting loads [5].

### 3.2. Selection of the indicator of the criterion for optimality of the mass of an aircraft-type UAV made with certain materials.

The criterion of optimality of the mass of the UAV is the basis of most studies of the perfection of the model. In some cases, for example, for aircraft-type UAVs, it is fully justified, since the reduction of mass and the associated complication of technologies almost always pay off with the ultimate increase in the efficiency of the design. In other cases, it allows only to create an image of an ideal design in order to assess the economic efficiency and justify the use of a particular material and design [2]. When studying the best parameters, it is necessary, first of all, to establish the indicator of the optimality criterion. It is convenient to take the efficiency coefficient of the model by mass as a basis for comparison  $K_{eff}^{masa}$ , which determines what part of the mass of the considered model  $i$  - model is from the mass of the most massive similar model  $k$  existing in a certain UAV classification for a certain period of time. The coefficient can be determined by the dependence [1]:

$$(1) \quad K_{eff}^{masa} = \frac{M_{imod}}{M_k}$$

Where:  $M_{imod}$  - the mass of the designed  $i$ -model UAV, with certain materials kg;  $M_k$  - the mass of the mass-similar  $k$  model UAV, kg.

For UAV skin materials working to obtain minimum stability, we assume an unreinforced smooth skin as the simplest

system. Then for corrugated and three-layer skins we will have the following coefficients:

$$(2) \quad K_{eff}^{masa} = \frac{M_{corr}}{M_{smoot}}, \quad K_{eff}^{masa} = \frac{M_{3\text{ lay } r}}{M_{smoot}}$$

Where:  $M_{corr}$  - the mass of corrugated, waffle sheeting, kg;  $M_{3\text{ lay } r}$  - three-layer cladding mass, kg;  $M_{smoot}$  - table of smooth single-layer cladding, kg.

In expressions (1 and 2) the masses of the compared types of shells depend on:

- the geometric parameters of the UAV and the mechanical properties of the materials from which they are made;
- specific strength - for structures working on stability, the strength of the UAV;
- specific stiffness - for structures working on stability, the strength of the UAV.

It is important to note that the ratio of the mechanical properties of the compared structures - thin-walled shells, structures do not depend on its other parameters. This allows us to represent expressions (1 and 2) as a product of two dimensionless quantities [10]:

$$(3) \quad K_{eff}^{masa} = K_{massa} K_{imod}$$

Where:  $K_{massa}$  and  $K_{Gmat}$  are the coefficient of optimality, perfection, qualities, relative weight of the material in UAV structures;  $K_{imod}$  the coefficient of optimality, perfection of the  $i$  - model, the model by mass. The proposed designation of the coefficient  $K_{eff}^{masa}$  allows to give a quantitative assessment of the considered, designed UAV model, as well as to compare it with any other variant, designed for example a three-layer model or with a corrugated model of the structures, the skin. This also allows to make a simultaneous comprehensive comparison of all design options and select the optimal one, which, through conducting experiments and tests, can subsequently be offered for production.

### 3.3. Selection of safety factors for the operation of aircraft-type UAVs with certain materials

In the field of strength of materials, the safety factor is a multiplier included in the calculations to ensure the reliability of the structure despite the uncertainty in the operation of the UAV. I would say that it "insures" against errors in load estimates, variations in material properties and simplifications in the calculation schemes when designing a UAV with a certain type of material [5]. It is known and especially in UAVs, structural elements must have a certain safety factor  $S_{fac}$ , i.e. the destructive load  $D_{load}$  must not exceed the operating, critical load  $C_{load}$  by a certain number of times. Its value is obtained from the ratio [11]:

$$(4) \quad S_{fac} = \frac{D_{load}}{C_{load}}$$

Where:  $D_{load}$  - is the destructive load on the UAV structure depending on the material, N;  $C_{load}$  critical load N.

By operational we mean the largest possible  $C_{load}$   $P_e$  load determined by calculation during normal operation. A destructive load is one that leads to a stress-strain state corresponding to mechanical destruction of the structure or the occurrence of large deformations that disrupt its normal operation.

Dependence of safety factors  $S_{fac}$  of all the factors that must be taken into account, there is no strict mathematical formulation. Their value is established as a certain standard margin of safety, adopted to ensure the reliability of the structure [4]. In this case, the following factors are taken into account [11]:

A. Safety during maintenance. If the destruction of the structure poses a danger to the lives of service personnel, then it is calculated with an increased safety factor.

B. The severity of the consequences that the destruction leads to. For example, damage to the structure can lead to damage or destruction of an entire complex of structures, the price of which is

sometimes tens of times higher than the price of the product. Product service life. Increased coefficients  $S_{fac}$  are used to calculate a structure with a long service life. Wear of the surfaces of parts, changes in the mechanical properties of the material, etc. are also taken into account.

C. Requirements for the rigidity of the structure (limitations on the amount of movement, absence or admissibility of residual deformations).

It is known that UAV structures primarily work on strength depending on the material used. In this case, strength calculations are carried out taking into account the mechanical properties of the material - strength limit  $\sigma_{ten}$  and yield strength  $\sigma_{yie}$ . For structures with repeated action, such as UAVs - fuselage, wings, landing gear, etc., the stresses arising from the operational load must not exceed the yield strength. In addition, these structures, taking into account the type of materials, must have a certain reserve  $R_{mat}$  relative to it, which guarantees no reduction in strength during the established service life of the UAV, even as a result of fatigue accumulation in the material. For the materials used to build modern UAVs, especially aircraft-type ones, the values of the coefficient  $S_{fac}$  are selected individually. The coefficient is selected in the following ranges [10]:

a. For plastic materials (steel, aluminum), with sufficiently accurate calculations, it is often used -  $S_{fac} = 1,2-1,5$ .

b. For brittle materials (expensive composites, styrofoam... some alloys), the values are usually higher -  $S_{fac} = 2 - 2,5$  or more.

c. For variable (cyclic) loads typical of UAVs the range is wider -  $S_{fac} = 2,5 - 4$ .

If data is scarce (few tests, material is heterogeneous - for example, stringers using glued construction or riveted part), it is used  $S_{fac} = 3 - 4,5$ , and in some cases a higher value.

### 3.4. Using cardboard material to design and manufacture an aircraft-type UAV

In recent years, aircraft-type unmanned aerial vehicles (UAVs) have rapidly gained popularity. Currently, expensive composite materials are used for fuselages and wings, offering numerous advantages, including light weight and high strength. However, it is known that UAVs are not always able to return "home", i.e. to their take-off point, and expensive composite materials are lost and never returned, which costs manufacturers significant funds. For this purpose, in the design and manufacture of UAVs, cardboard is used, as has become customary in practice, and corrugated cardboard, or pressed paper in the form of laminated plastic (BSP) has been and is widely used for this purpose. Implied by forecasting in financial management [12]. Cardboard has the following advantages as a material for UAV structures:

Price. Cardboard is extremely cheap, both the material itself and the processing.

Weight. Cardboard cases are significantly lighter than metal or plastic ones, which simplifies transportation and installation of equipment.

The mechanical properties of cardboard determine its ability to withstand various external influences and loads. Due to its multi-layer structure and high density, cardboard has a number of unique characteristics compared to paper [13]:

1. Hardness: Due to its multi-layer structure, cardboard is significantly harder than paper. It is able to resist deformation under external loads, which makes it ideal for use in the packaging industry.

2. Tensile strength: Cardboard has high tensile strength, which allows it to withstand significant tensile forces without damage. This is especially important for transport packaging.

3. Bending strength: High bending strength allows cardboard to withstand deformation when bending, while maintaining its shape and structure.

4. Puncture resistance: The cardboard is resistant to puncture, which is important for protecting the contents of the package from external mechanical influences.

5. Elasticity: The cardboard is able to restore its original shape after the load is removed, if the applied load does not exceed its strength characteristics.

6. Flexibility: Despite its high rigidity, the cardboard is flexible enough to be formed into various shapes without damaging its structure, which is important for the production of folding packages.

7. Flexibility: Despite its high rigidity, the cardboard is flexible enough to be formed into various shapes without damaging its structure, which is important for the production of folding packages.

7. Directional dependence: The mechanical properties of the cardboard can vary depending on the direction of production. This must be taken into account when designing and using cardboard packages.

8. Influence of composition: The strength and stiffness of paperboard depend on its fiber composition, the amount of fillers and sizing. Materials made from unbleached and bleached pulp show the greatest strength.

9. Moisture resistance: Paperboard has good moisture resistance, especially if it has undergone special treatment. High-quality waterproof paperboard retains at least 75% of its strength after exposure to high humidity. These properties make paperboard a versatile material for various applications, including packaging, printed matter and some types of printed products, such as calendars, folders and book covers.

Military drones made of cardboard are a new revolution in unmanned aerial vehicles. They are extremely cheap, easy to assemble like a children's construction set, and can fly over 100 kilometers. Here are details about their strength and payload:

Key features:

- Technology: The body is made of special waxed corrugated cardboard. It is impregnated with wax so that it does not fall apart from rain or moisture.

- Supporting structure: To achieve strength, a multi-layer construction (corrugated cardboard) is used. Two smooth sheets cover an inner corrugated layer that absorbs vibrations and loads.

- Payload: This type of UAV weighs about 2.4 kg empty, but can carry up to 3–5 kg (in heavy versions up to 6 kg) of payload.

Cardboard wings have surprisingly good aerodynamic characteristics, which are close to those of classic foam or balsa wings. Their main advantage is the ratio between low dead weight and high stiffness, which is achieved through the internal geometry of the corrugated cardboard.

Aerodynamic profile and geometry:

- Relative thickness: Profiles with a thickness between 10% and 15% of the chord length are used. This provides a balance between high lift and space for internal reinforcing spars (beams).

- Sweep and shape: Wings are most often rectangular or trapezoidal in order to make cutting and folding from a flat sheet of cardboard as easy as possible.

- Wing quality (L/D): The aerodynamic quality (lift to drag ratio) varies between 8:1 and 12:1, which is quite sufficient for stable gliding flight over long distances [9].

Main limitations:

- Critical speed (Flutter): Due to the lower modulus of elasticity compared to carbon fiber, cardboard wings are susceptible to dangerous vibrations (flutter) at speeds above 90–100 km/h.

- Deformation under load: At high levels of overload (sharp turns), the wing can change its profile, which worsens controllability.

The wingspan and flight speed are the most critical factors that determine whether a cardboard wing will fly stably or break up in the air. Since cardboard is more elastic than carbon fiber, the geometry must comply with strict engineering limits. The industry benchmark is taken from real combat data from the Australian cardboard drone Sypaq Corvo PPDS and new Japanese developments such as Air Kamuy 150 [9].

Optimal Wingspan

In cardboard UAVs, the wingspan is usually maintained between 1.5 and 2.8 meters:

- Standard (2.0 meters): The basic Corvo PPDS model uses exactly 2 meters of span. This allows the wing to be folded from

a standard flat sheet of cardboard without requiring splicing, which would weaken the structure.

- Extended version (2.8 meters): The heavy-duty Corvo PPDS-HL (Heavy Lift) model reaches 2.8 meters of span. However, at this size, it is mandatory to implement an internal spar (longitudinal beam) made of wood (balsa/plywood) or thin aluminum tube to prevent the cardboard from folding at the root of the wing.

- Surface roughness: Cardboard has a higher roughness than plastic. This leads to an earlier transition from laminar to turbulent boundary layer, which slightly increases profile drag, but prevents sudden flow collapse (stall).

- Wax coating: A protective layer of varnish or wax not only keeps out moisture, but also reduces surface friction, improving overall aerodynamic efficiency. Torsional stiffness: The corrugated inner layers act as natural ribs.

Flight Speed

Cardboard performs best at low to medium speeds due to the specifics of air resistance:

- Cruising speed (60 km/h): This is the golden mean for cardboard platforms. At 60 km/h (about 16.6 m/s), the load on the structure is minimal, and the aerodynamic quality allows for maximum flight range (up to 120 km) with minimal battery consumption.

- Maximum dive/attack speed (up to 100–120 km/h): The latest cardboard drones reach maximum speeds of up to 120 km/h when attacking.

Critical Limit (Beyond 120 km/h): Above this speed, the cardboard wing enters a zone of aerodynamic flutter (uncontrollable vibrations). Since cardboard does not have the same torsional rigidity as plastic, twisting the wing at high speed immediately leads to a loss of control or mechanical rupture.

Relationship: Span vs. Speed

The greater the span, the lower the maximum speed must be, unless the wing is heavily reinforced internally [8]. For a cardboard airplane without an internal supporting frame, the most efficient aerodynamic formula is:

- Wingspan: 2.0 meters
- Chord (wing width): 25–30 cm
- Speed: 60–80 km/h

Considering these software and physical limits:

We calculate the wing area and the required motor power for a specific weight.

Folding the profile (e.g. NACA 4415) to achieve maximum lift from cardboard.

1. Angle of Incidence: Mounting the wing to the fuselage at a constant inclination of  $+2^\circ$  to  $+3^\circ$ . This way, in horizontal flight, the profile generates optimal lift with minimal resistance.

2. Smoothing the leading edge: The leading edge takes the first blow of the airflow. We stick it with reinforced tape or impregnate it abundantly with wax/varnish. Any crushing there spoils the characteristics of the profile and leads to a loss of lift.

3. The Safety Factor ( $f_s$ ) for cardboard UAVs is usually chosen in the range between 1.2 and 1.5.

4. Unlike manned aviation (where ( $f_s = 1.5 - 2.0$ ) is sought) or civil construction, cardboard drones are inexpensive devices for single or short-term use. The goal here is to balance between minimal weight of the structure and sufficient strength to withstand flight.

5. Here is how this coefficient is distributed and calculated depending on the loads:

Table 1. FEA values. If the board is entered into a static analysis software (e.g. ANSYS or SolidWorks Simulation), the Orthotropic material model is selected. Here are the typical base ratios that the industry uses for quality three-ply corrugated board

| Mechanical property          | Direction MD (Longitudinal)       | Direction CD (Transverse)       | Direction ZD (Thickness) |
|------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|--------------------------|
| Young's modulus (Elasticity) | ~1200 MPa                         | ~400 MPa                        | ~10-20 MPa               |
| Tensile strength             | ~30 MPa                           | ~12 MPa                         | ~0.5 MPa                 |
| Shear Modulus                | $G_{12}$ (on the plain): ~500 MPa | $G_{13}$ (transversely): ~5 MPa | $G_{23}$ : ~3 MPa        |

Combining two layers of paperboard with a 90-degree cross orientation is a classic engineering technique inspired by the structure of plywood and modern composite materials (carbon/fiberglass). By bonding two layers at right angles, the weakness of a single paperboard in the transverse direction (CD) is eliminated and a quasi-isotropic panel with high strength in all directions is created.

## 8. The economic aspect is based on the UAVs and other materials

When using unmanned aerial vehicles (UAVs) made of modern materials for surveillance, research, reconnaissance, etc., their characteristics provide economic advantages expressed in the following:

- 1) Higher duration of the UAV flight at a low operating cost for their manufacture and use - costs per unit area, distance traveled, etc.;
- 2) Economic advantage resulting from the insignificant investments made in them - lower costs for purchase and operation.
- 4) Round-the-clock operation of the UAV in all weather conditions.
- 5) The loss of a UAV made of cardboard in terms of cost is incomparable with the work it has performed for its intended purpose.

The above advantages correspond to financial management, which is the most modern way of managing modern organizations for the design and production of UAVs with innovative materials, operating in a market economy. The implementation of a new and complex vision for the content of an advanced system of tools for the financial management of production using cardboard in UAVs is essential for the management of any company [7].

## 9. Conclusion

The article proposes a mathematical model for determining the static deformation and the angle of rotation of a console, with a presented model of an artillery system body. The used modeling package SOLIDWORKS allows it to be used to obtain first-approximation results for the design of artillery systems.

## Literature

1. Badagin A., Muhamedov F.A. Konstruktion von Leichtflugzeugen. M. Maschinenbau, 1978–2028, S.
2. Dobrynin D.A., Anwendung kleiner UAVs vom Multikopter-Typ, Robotik und technische Kybernetik 1 (2./2014, UDC: 623.746-519)
3. Kazakov Y.V., Chuhchin D.G., Untersuchung der Strukturbildung von Zellulosefasermaterialien mittels Kryofixierung und Lyophilisierung // Probleme der Mechanik von Zellulose-Papiermaterialien: Material der II. Internationalen wissenschaftlich-technischen Konferenz. Archangelsk, 2013. S. 56–63.
4. Krasilshchikova M.N., Sebyakova G.G., Management und Steuerung unbemannter, manövrierfähiger Luftfahrzeuge auf Basis moderner Informationstechnologien, Fizmatlit, 2003.
5. Kanchev N., Optimierung der Topologie dünnwandiger Kraftelemente mittels eines Interpolationsmodells unter Verwendung der SIMP-Methode. Proceedings der jährlichen internationalen wissenschaftlichen Konferenz der Georgi Benkovski University of Applied Sciences, Oktober 2020, Dolna Mitropolia, S. 64-75, ISSN 2738-716X.
6. Kanchev, N., Application of fused deposition modeling approach for 3d printing in the design and manufacturing of small unmanned aerial vehicles. aeronautical research and development, Volume 3, 2024 "Georgi Benkovski" Bulgarian Air Force Academy, стр. 85-96, p-ISSN 2815-293X, e-ISSN 2815-2948
7. Mineva S.K., Forschung und Verbesserung der Effizienz des Finanzmanagements moderner Organisationen, Nationale Universität „V. Levski“, V. Tarnovo, (2025).
8. Ma J., Wang Z., Zhou X., Xiao H. Selbstverstärkte, fettabweisende Blätter durch Behandlung von Papier mit

- Zinkchloridlösung, BioRes. 2005. Band 10, Nr. 4. Seiten 8225–8237. DOI:10.15376/biores.10.4.8225-8237.14. Hellawell J.M., 10.
9. Stratton R.A., Corlson N.L. Fiber wall damage during bond failure, Nordic Pulp Paper Res. J. 1993. N2. Pp. 245–249.
10. Tarasov Yu., Lavrov B.A. Festigkeitsberechnung von Flugzeugbauteilen, Samara 2000.
11. Voskoboynikov M., Lagosyuk G., Malenky Yu. Konstruktion und Festigkeit von Flugzeugen und Hubschraubern. Verlag „Transport“, 1972, S. 1–440.
12. <https://tech-e.ru/kartonnye-korpora.php>, Cardboard enclosures for equipment and UAVs: an ecological and affordable solution. 20.05.2026r
13. <https://www.calculate.ru/articles/fiziko-mehanicheskie-harakteristiki-kartonov> Physical and mechanical characteristics of cardboard. 15.06.2026.

# Numerical Modeling of Smoothbore Barrel Shot

Assoc. Prof. Dr. Eng. Nikola Nikolov\*, Eng. Tsvetan Nikolov  
Institute of Mechanics, Bulgarian Academy of Sciences, 1113 Sofia, Bulgaria  
\*n.nikolov@imbm.bas.bg

**Abstract:** This work reports preliminary outlined relations between geometrical parameters and material parameters of smoothbore barrel and projectile during the internal stage of shot depending on the time variation of barrel pressure. Mechanical behaviors of barrel possessing diameter 18.2mm with length 760mm and projectile having cylindrical form with half-spherical form in the nose are 3-D modeled by help of the commercial Finite Element Method program product Ansys LS-DYNA. A barrel and three projectiles with different densities under five different friction conditions are numerically modeled with aims to establish both the projectile displacements and velocities, and related kinetic energy. Four stages in the projectile diagrams "Displacement-Time" and "Velocity-Time" are established correspondingly to the "Barrel Pressure-Time" diagram. Stress and strain states of barrel and projectile are reported.

**Keywords:** SMOOTHBORE BARREL, SHOT, CYLINDRICAL PROJECTILE, DENSITY, FRICTION, FINITE ELEMENT METHOD

## 1. Introduction. Stages of shot process.

The elaboration is inspired by the fact that the numerical modeling of given process could ensure opportunities of preliminary theoretical investigations on dependencies between ruling factors and chosen criteria for an optimal process performance. Such modeling accomplished before the enlargement of existing theoretical works, the development of new techniques and technology or even before the formulation of real physical experiments could reduce the time and costs of the investigations. Additionally, the obtained results could give new directions of future researches. The process of smoothbore barrel shot is initiated and advanced in an ensemble composed by the barrel-itself, projectile, propellant, and corresponding designs of barrel chamber, barrel muzzle, cartridge-case where specific combustion cameras ensure initial stage of the process [1, 2].

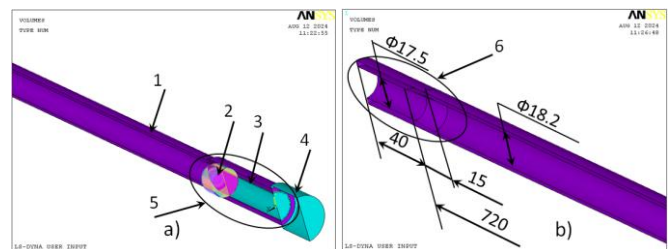
A process of smoothbore barrel shot basically comprises of (I) internal stage, which starts with the ignition and firing of the primer and propellant in the cartridge-case, Fig. 1a, and ends with the projectile exit from the barrel muzzle, Fig. 1b, (II) transitional stage, which starts when the projectile leaves the muzzle, Fig. 1c, until the projectile achieves the state of stable free flight, (III) external stage starting with a stable flight of the projectile and ending with contact in the target, the terminal stage finally [1, 2]. Here, the internal stage (I) of the shot, Fig. 1c, will be numerically modeled depending on (1) the friction conditions between projectile and barrel and (2) the projectile weight. The friction conditions are represented by five coefficients of friction. The projectile weight is represented by three densities of a projectile possessing cylindrical volume ending with half-sphere having the same diameter. That second could give an opportunity to interpret different projectile designs including projectile jackets, volumes of cores or different sabot underbore forms, but under conditions that all these to have the total preliminary given weight. Also, the kinetic energy is classically expressed by half-product of the weight and the second degree of velocity [1]. If it is wanted to increase the maximum power of percussion action with a constant propellant and weapon characteristics, then it should to increase the velocity by decreasing of the projectile mass i.e. an optimization task arises. The shot process is computed in eleven steps, each of them with seven substeps. The proper coefficient of friction gives an opportunity to choose different materials and surface roughness in order to obtain the optimal friction conditions under given in advance pressure-time dependency in the barrel or to change in advance given such dependencies according to the friction conditions.

The aim of this elaboration is to outline preliminary some basic relations between parameters of shot as displacement and velocity of the projectile in the barrel depending on the projectile weight and the friction conditions between the barrel and projectile. For this purpose a numerical finite element model applying commercial program product Ansys LS-DYNA is developed and eight simulations of the shot process of are carried out. As results both the projectile displacements and velocity are established, projectile

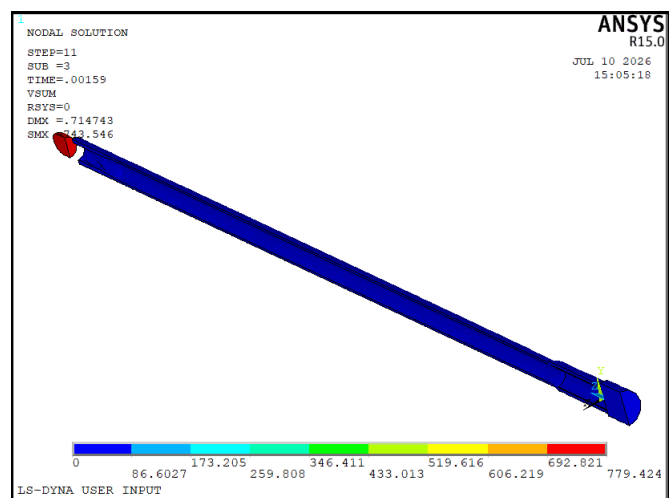
kinetic energy near to the muzzle is calculated, and stress – strain states in the projectile and barrel are found.

## 2. Technical devices for production of shot. Smoothbore barrel. Geometry. Ammunitions.

A basic part in the weapons is the barrel [3, 4]. A proper design of barrel represents a complex task which is related not only to mathematical calculations and choice of material but also with designs of proper processing technologies, proper ammunitions, properly attended loading elements and corresponded bearing and transporting systems. The numerical model here discussed is composed by four parts: 1-smoothbore barrel, 2-projectile, 3-cartridge-case and 4-breech-block interacting under corresponding contact conditions between them. At the back the barrel begins with 5-chamber where the cartridge is placed, Fig. 1a. The barrel ends in front with 6-muzzle where a choke part could be appeared, Fig. 1b.



**Fig. 1. a)** 3-D section of smoothbore barrel. 1-barrel, 2-projectile, 3-cartridge case, 4-breech-block, 5-barrel-chamber, **b)** 6-muzzle and choke.



**Fig. 1c** The end of the internal stage and start of the transitional stage during a process of shot with projectile having density of 1820kg/m<sup>3</sup> (weight 8 grams) under coefficient of friction  $\mu=0.15$ .

Each of them could have different design independently of the type of weapon but with one and the same goal to increase the percussion action [3, 4]. In this work an exemplary design of barrel



is treated with its corresponding elements. That is not a precise barrel of real weapon, and it does not pretend to be exact design of real weapon barrel because the efforts of this work are only reduced to outline preliminary principal possibilities of development of numerical model of such types shot process.

### 3. Assumptions and numerical setup of the task.

In Fig. 2 the geometrical sizes of 5-barrel-chamber, 3-cartridge and 2-projectile are given. The cartridge-case is not presented as a whole as design because the subject of this elaboration is displacement of the projectile in the barrel during internal stage of shot discarding the preliminary combustion and explosion processes provoking this displacement.

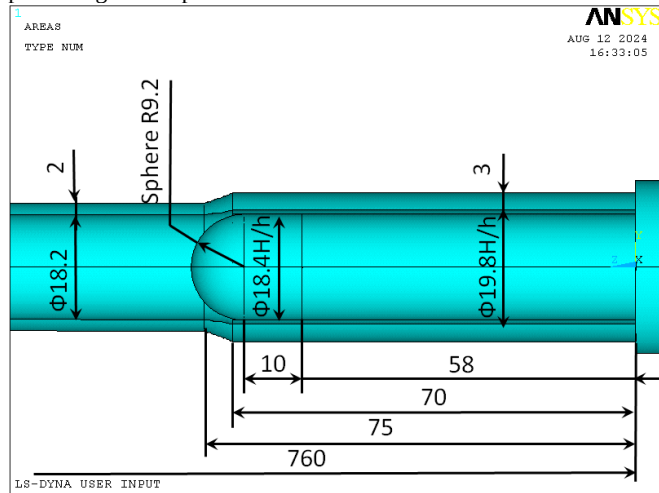


Fig. 2. Sizes of the barrel-chamber, projectile and cartridge-case.

A coordinate system Oxyz is embedded between the barrel and the breach. The barrel has inside diameter of 18.2mm and total length 760mm. In back part, it has a chamber with larger inside diameter of 19.8mm and length 70mm where the cartridge is placed. The cartridge has outside diameter 19.8mm and inside diameter 18.4mm with length 70mm. The barrel-chamber is closed by the breech which represent a cylinder with diameter 30mm and length 30mm. In front the barrel has a choke part with diameter 17.5mm and length 40mm connected to the basic barrel part by cone with length 15mm. The projectile is composed by a cylindrical part with diameter 18.4mm and length 10mm with volume  $2.66 \times 10^{-6} \text{ m}^3$  and hemispherical part with the same diameter of 18.4mm and volume  $1.64 \times 10^{-6} \text{ m}^3$ . The barrel is meshed with 3-D 8-nodes finite elements Solid 164. The cartridge, breech and projectile are meshed with 3-D 10-nodes finite element Solid 168. The barrel is divided in 15500 finite elements with 2260 nodes. The cartridge is divided in 4563 elements with 9348 nodes. The projectile is divided in 298 finite elements with 579 nodes. The breech is divided in 295 finite elements with 559 nodes. It is unmovably and rigidly connected to the chamber, it is not loaded by the barrel pressure *i.e.* it does not take into account recoil effects. The mechanical properties of the materials are given in Table 1. They are chosen as representative and are not related to given barrel and projectile material data [5, 6].

Table 1: Mechanical properties of material models.

|                              | Barrel and Breech | Cartridge | Projectile       |
|------------------------------|-------------------|-----------|------------------|
| Density [kg/m <sup>3</sup> ] | 7800              | 4500      | 1820, 2730, 3640 |
| Elastic module [GPa]         | 210               | 150       | 180              |
| Yield stress [MPa]           | 1350              | 150       | 1080             |
| Poisson's ratio              | 0.29              | 0.35      | 0.34             |

The fittings between the barrel-chamber and the cartridge and the cartridge and projectile are assumed as free-sliding ones of type H/h for hole/shaft, Fig. 2.

The contact conditions between outside surface of the cartridge-case and inside surface of the barrel-chamber are modeled by coefficient of friction 0.1. The friction between the inside surface of cartridge and projectile is modeled by coefficient of friction 0.5. The contact friction between barrel and the projectile is modeled by five friction coefficients 0.01, 0.05, 0.1, 0.15 and 0.2. In this work both the friction coefficients static and the dynamic are assumed with these equal values above reported. Variations of friction depending on the velocity are not taken into account. The weight of the projectile is modeled by help of three different densities, given in Table 1 and multiplied by the projectile volume of  $4.3 \times 10^{-6} \text{ m}^3$  they give projectile weights nearly of 8, 12, 16 grams.

Series of numerical simulations of the process of shot are performed through the geometries of barrel and projectile given in Fig. 2.

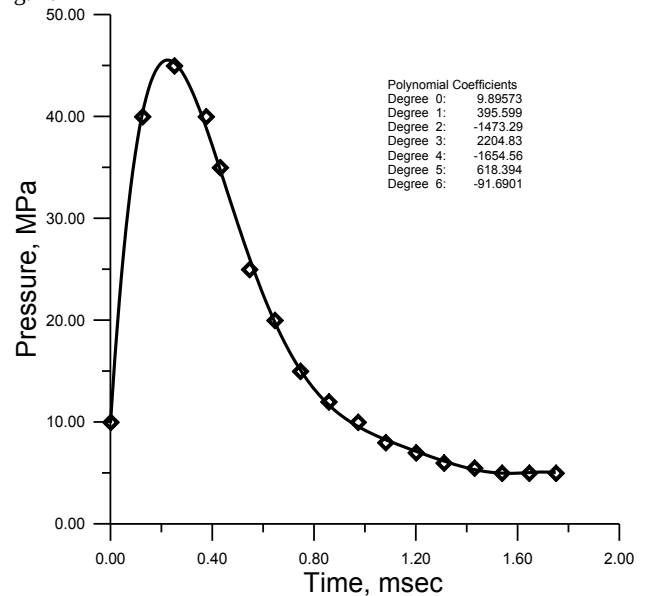


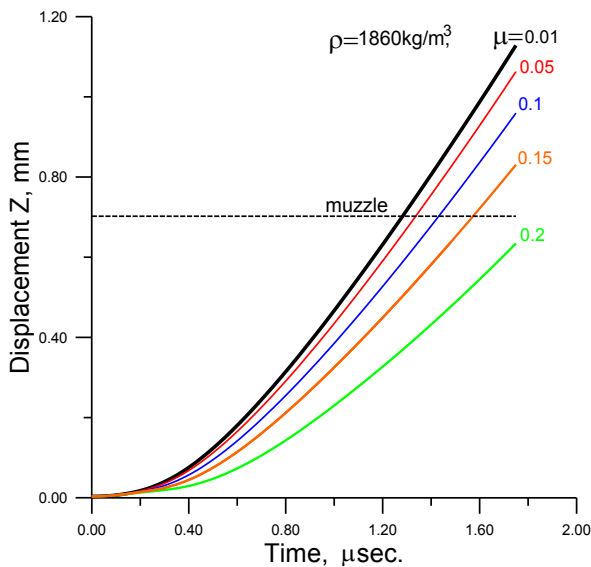
Fig. 3. Diagram of Barrel pressure as function of time.

The barrel pressure is assigned according to “Pressure – Time” diagram given in Fig. 3. The same this pressure loads the base of the projectile. Here, the pressure forces acting in the volume closed between the projectile base, cartridge inside and the breech could be or not be translated to the projectile base by additional elastic elements as shock-absorbers, gasket and others, occupying the distance of 58mm, Fig. 2. The type of the “Pressure-Time” diagram given in Fig. 3 could be different with shifted maximal pressure in the time. That is depended on the type and contents of the propellant and design of the cartridge [2, 5].

### 3. Results and Discussions

Which effects will cause the increase of the friction coefficient is arising as a question. The projectile starts to move when the forces initiated by the propellant pressure override the friction forces between the projectile and the cartridge-case. These friction forces are specific for each cartridge and result from its design. In this work the displacement of the projectile is modeled depending on its weight and the friction coefficient between the barrel and the projectile. The friction coefficient between the projectile and cartridge-case, as well this one between the cartridge-case and barrel are assumed as constants. The obtained results are given in Fig. 4. With smoothbore barrel and lowest coefficient of friction 0.01 between the barrel and the projectile, the displacement of the projectiles after exit of barrel under pressure 7.5-8MPa is 1.13m. The projectile leaves the barrel in time 1.277 milliseconds with velocity  $V_z=860 \text{ m/sec}$ , and the velocity is increased to 956m/sec after leaving the barrel in distance 0.37m at time 1.75 milliseconds. This is the case of shot with both the lowest friction and weight. According to the classical  $E_k=0.5mV_z^2$ , the maximal kinetic energy is  $E_k=2958.4 \text{ J}$ , where  $V_z$  is in m/sec,  $m$  in kilograms. When  $\mu=0.15$   $V_z=712 \text{ m/sec}$  and  $E_k=2031 \text{ J}$ , it is nearly 1/3 lower.

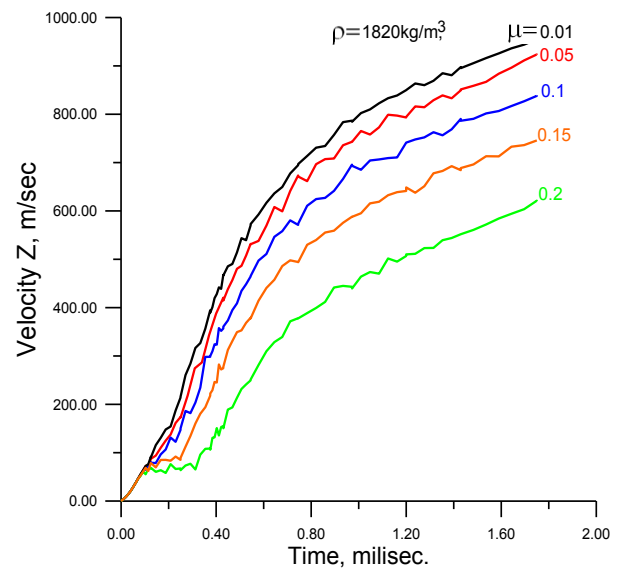
In Fig. 3 diagrams showing the change of the barrel pressure in time beginning with primer ignition is given. The character of this diagram could be different with movement of the maximum in the time. Here a diagram is taken as an illustrative one from [2]. The diagram could be separated in four basic parts. In the first part a sharp increase of the pressure from 0 to the maximum of 45MPa (450atm) is observed for 0.25milliseconds. Next, after this maximum a part with smooth pressure decrease to 12.5MPa, asymmetric to the increasing part, is seen in time 0.8 milliseconds. After that a decrease of the pressure to 5MPa is seen from time 0.8msec to 1.6msec. During the commented four stages the projectile has increasing velocity with non-uniform displacement in the barrel. These described four stages have close dependency on the contents of the propeller and its rate of compression in the cartridge as well the design of the cartridge [2, 5].



**Fig. 4** Diagrams “Displacement - Time” obtained for projectile with density  $1820\text{kg/m}^3$  under friction coefficients  $\mu$  in range 0.01, 0.05, 0.1, 0.15, 0.2.

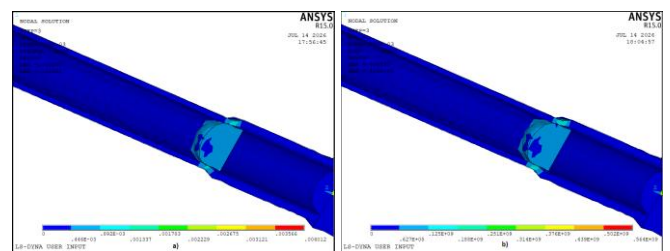
In Fig. 4 the displacement of the projectile in the barrel is given in time dependency under coefficients of friction 0.01, 0.05, 0.1, 0.15 and 0.2 with the barrel. The place of the barrel muzzle is given by horizontal dashed line showing the moment when the projectiles leave the barrel. The given curves could be also divided in four parts corresponded in the time to the four parts in Fig. 3. A small displacement of the projectile is read in the first part at time 0.1 milliseconds for the five coefficient of friction. At time 0.8 milliseconds, with  $\mu=0.01$  the displacement has highest value of 0.35m while with  $\mu=0.2$  it has lowest value of 0.15m. The projectile with the lowest friction coefficient first leaves the barrel in time  $t=0.122$  milliseconds. The projectile with the friction coefficient 0.15 leaves the barrel for largest time 1.6 milliseconds, while this having  $\mu=0.2$  does not reach the muzzle. This projectile has displacement of 0.63m. The pressure of 5MPa in the last stage is not sufficient for its leaving of the barrel according to this simulation. After the beginning of the third and four stages at time 0.8-0.9 milliseconds the displacements described by the four curves have linear tendencies. The diagrams “Velocity Z – Time” given in Fig. 5 are also divided in the same four parts, analogically to Fig. 3, 4 as they are consequences of these figures. In the first stage until time 0.23-25 milliseconds with friction coefficient 0.01 increasing velocities to 300m/sec and to 180m/sec could be read for  $\mu=0.01$  and 0.1, respectively. That is nearly 60% increasing velocity with ten times decreasing friction. At time 0.1-0.3 milliseconds, with the highest friction coefficients of 0.15 and 0.2 a horizontal tendency with constant values 80-90m/sec is observed. That suggests holding of the projectile by friction and insufficiency of pressure 45MPa to accelerate the projectile to the maximal pressure. The increased friction above  $\mu=0.1$  leads to change of the character of “Vz-Time”-curves. A new intermediate stage appears between I- and II-stage, and it is not related to the “P-Time” diagram. That shows because

of friction, the conclusions based on Fig. 3 could not be made automatically. Moreover, this is the moment of bending in the “P-Time” diagram. During the second and third stages the velocities increase but with decreasing acceleration. During the fourth stage (the period of after-action of the propellant gases) for  $\mu=0.01$  the velocity achieves values from 820 to 950m/sec, and for  $\mu=0.2$  the velocity of 600m/sec appears as an insufficient for the projectile to leave the muzzle.

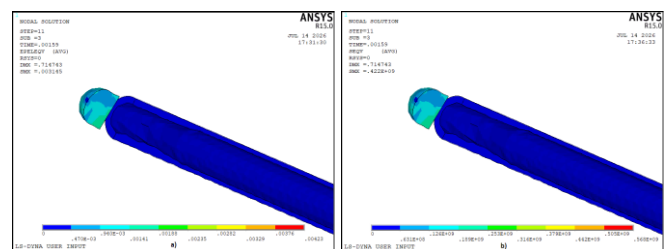


**Fig. 5** Diagrams “Velocity Z - Time” obtained for projectile with density  $1820\text{kg/m}^3$  under friction coefficients  $\mu$  in range 0.01, 0.05, 0.1, 0.15, 0.2.

In Fig. 6a, b the distributions of the strain and stresses in the volume of the projectile and in the transition part of the barrel are given in the beginning of the internal stage at friction coefficient  $\mu=0.15$  and  $m=8$  grams. This is a heaviest numerically possible regime of shot with these parameters. Strains and stress in range of 0.00137 and 188MPa are read. The strain values are sufficiently lower than the theoretical plastic strain limit of 0.02. This circumstance appears as an important one during the design of barrel because it suggests absence of plastic deformations.



**Fig. 6 a)** Equivalent strain distribution **b)** and Mises stress distribution in the barrel and projectile in the start of internal stage at shot with projectile having density  $\rho=1820\text{kg/m}^3$  (8grams) under friction  $\mu=0.15$ . Step 3/1, Time  $t=0.146$  milliseconds, Displacement  $U_z=9.59\text{mm}$ , Velocity  $V_z=69.5\text{m/sec}$ .

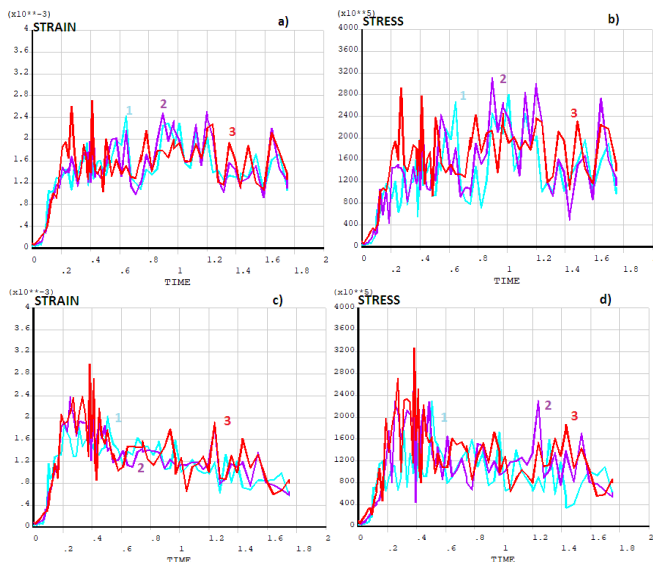


**Fig. 7 a)** Equivalent strain distribution **b)** and Mises stress distribution in the barrel and projectile in the end of internal stage at shot with projectile having density  $\rho=1820\text{kg/m}^3$  (8grams) under friction  $\mu=0.15$ . Step 11/3, Time  $t=1.59$  milliseconds, Displacement  $U_z=714.7\text{mm}$ , Velocity  $V_z=743.5\text{m/sec}$ .

In Fig. 7 the strain and stress distributions in the volumes of projectile and barrel are given in the end of the internal stage for the same shot parameters. The strain and stress values are in maximums

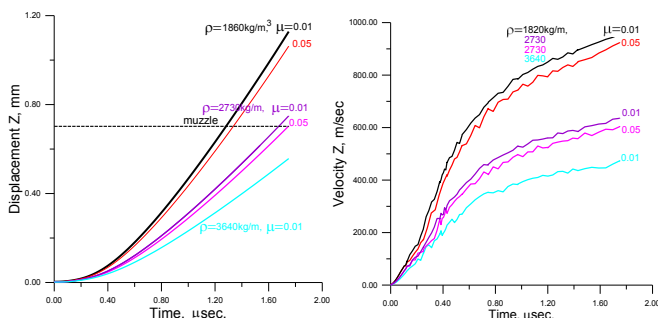
of 0.00235 and 316MPa. That suggests the projectile undergoes increasing elastic strains with increasing stress, there is no plastic deformation. The same is valid for the barrel.

The stress and strain states on the surface of projectile with density  $1820\text{kg/m}^3$  ( $m=8$  grams) is given for three nodes under friction coefficients 0.15 and 0.01, Fig. 8a-d. The nodes 1, 2 and 3 are placed as follows, Fig. 2, in the projectile forward between the end of spherical and beginning of cylindrical parts, in the middle cylindrical part and in the rear cylindrical part. In Fig.8a, c, sharply increasing strain and stress values from 0 to 0.0024 and 240MPa are seen for both the coefficients until time 0.23 milliseconds, when the maximal pressure is overcome Fig. 3. After that, under  $\mu=0.15$  a tendency of keeping the strains 0.002 and stress 200-240MPa is observed, Figs 8a, b, while under  $\mu=0.01$  a smooth decrease to 0.0008 in strains and to 80MPa in stresses is observed, Figs 8c, d.



**Fig. 8** Distributions of **a, c**) strain and **b, d**) stress in the projectile during the internal stage of the shot with coefficients of friction **a, b**) 0.15 and **c, d**) 0.01 at density  $1820\text{kg/m}^3$ . 1–in the forward part, 2–in the middle part, 3–in the rear part.

In Fig. 9a, diagrams “Displacement Z -Time” for projectiles with densities of 1820, 2730 and  $3640\text{kg/m}^3$  under friction coefficients  $\mu=0.01$  and 0.05 are given in order to outline the projectile weight influence on the shot. Clear separations of the curves depending on the increasing projectile weight in 1.5 time and in 2 times are seen with the 5-multiple increase of friction. Comparisons in the end of II-stage, in time 0.8 milliseconds, show displacements of 0.3 and 0.17m for densities  $\rho=1820, 2730\text{kg/m}^3$ .



**Fig. 9** Diagrams **a)** “Displacement - Time” and **b)** “Velocity Z - Time” obtained for projectiles with densities  $\rho=1820, 2730, 3640\text{ kg/m}^3$  under friction coefficients  $\mu=0.01, 0.05, 0.1$ .

The comparisons of the weight projectile influence on the projectile velocity, shown by diagrams “Velocity Vz –Time” in Fig. 9b, also clearly outline this separation effects above commented. The projectile having density  $\rho=2730\text{kg/m}^3$  ( $m=12$  grams) leaves the muzzle with velocity close to 600m/sec. This velocity is lower nearly of its-half than the velocity 860m/sec obtained with density  $\rho=1820\text{kg/m}^3$ . But here the tendency to achieve a constant velocity

should be marked i.e. the transitional shot stage is going to finish and the projectile is going to free flight – third external stage of shot commented in the Introduction. The projectile having density  $\rho=3640\text{kg/m}^3$  (here interpreted as designed weight  $m=16\text{grams}$ ) does not achieve the muzzle at the lowest friction according to this FE-model of shot. Similarly to the higher friction of  $\mu=0.2$  at lowest weight as it is seen in Fig. 4, changes will be needed in weight or in “P-Time”-curve. Despite the lowest friction this projectile needs of higher maximal barrel pressure or another type barrel “Pressure-Time” diagram in order to overcome the I-stage. So, in this case, it could be concluded the decreasing weight of the projectile is more essential to realize a shot than the friction. At the same time, to achieve higher muzzle velocity, respectively higher  $E_k$  and percussion power, it is essential the weight not to be too higher under the same barrel “Pressure-Time” diagram. The last ratiocinations are related to optimization tasks concerning as design of barrels as well as design of propellants and cartridges. Comparisons between parameters of the eight simulations of smoothbore barrel shot here performed are given in Table 2.

**Table 2:** Parameters of the shots in the end of internal stage.

| Density [ $\text{kg/m}^3$ ] vs. Friction. | Time [msec] | Distance [m] | Velocity Vz [m/sec] | Kinetic energy [J] |
|-------------------------------------------|-------------|--------------|---------------------|--------------------|
| $\rho=1820, \mu=0.01$                     | 1.276       | 0.697        | 860                 | 2960               |
| 0.05                                      | 1.315       | 0.684        | 829                 | 2748               |
| 0.1                                       | 1.430       | 0.701        | 786                 | 2493               |
| 0.15                                      | 1.590       | 0.713        | 712                 | 2031               |
| 0.2                                       | 1.750       | 0.634        | 620                 | 1538               |
| $\rho=2730, \mu=0.01$                     | 1.643       | 0.682        | 615                 | 1517               |
| 0.05                                      | 1.750       | 0.703        | 602                 | 1451               |
| $\rho=3640, \mu=0.01$                     | 1.750       | 0.557        | 471                 | 889                |

### 3. Conclusions

A smoothbore barrel shot is numerically modeled. The projectile displacements and velocity, stress-strain states in the barrel and projectile are established depending on the barrel-projectile friction and projectile weight. Four stages similar to the barrel “Pressure-time” diagram are identified in the projectile “Displacement-Time” and “Velocity-Time” diagrams. A crucial inter-stage related with the higher than  $\mu=0.1$  friction is found. Projectile kinetic energy near to the muzzle is calculated.

### 4. References

1. R. Bolton-King, J. Schulze, Firearm and Ballistics, Chapter 7 Firearms and Ballistics. In: *Practical Veterinary Forensics*, ed. Bailey, D. Wallingford, UK: CABI, (2016) pp. 81-117.
2. Iv. Topalov, *Hunting weapon and shot on game*, Sofia, (1972) pp.142 /in Bulgarian/
3. N. Ahmed, R. D. Brawn, A. Hameed, Finite Element Modeling and Simulation of Gun Dynamics using ‘ANSYS’, *Tenth International Conference of Computer Modeling and Simulation* (IEEE 2008), pp.18-22.
4. S. Deng, H. K. Sun, Ch.-J. Chiu, K.-Ch. Chen, Transient finite element for in-bore analysis of 9 mm pistols, *Appl. Math. Modelling* **38** (2014) pp. 2673–2688.
5. M. Akcay, Internal and transitional ballistics solution for spherical and perforated propellants and verification with experimental results, *J. of Thermal Science and Technology*, **37**, 1 (2017) 35-44,
6. A. B. Edward, P. St. Heyns, Sch. Kok, A Numerical Investigation of a Single-Shot in a DEM-FEM Approach to Shot Peening Simulation. *Metals* **9** (2019), 1183.

# Some peculiarities of the security system elements development related to the implementation of the business plan for scientific research

Valeri Panevski<sup>1</sup>, Marina Hristova<sup>1</sup>

Institute of Metal Science Equipment and Technologies with Hydro- and Aerodynamics Centre "Acad. A Balevski" at the Bulgarian Academy of Sciences, 67 Shipchenski Prohod Street, 1574 Sofia, Bulgaria <sup>1</sup>  
panevski@ims.bas.bg, marina.h@ims.bas.bg

**Abstract:** Research organizations play an important role in diversifying and strengthening the research system through the implementation of projects and partnerships that contribute to the social and economic well-being of our country.

*This publication presents elements of the authors' experience in conducting scientific research through the development and implementation of a business model for managing applied scientific developments in the implementation of a project in the field of security of national critical infrastructure sites in seaports, through which a process is established for identifying, assessing and mitigating potential risks in a systematic, consistent and documented manner.*

**Key words:** SECURITY SYSTEMS, CRITICAL INFRASTRUCTURE, SCIENTIFIC RESEARCH

## Introduction

The main objective of the Business Model (BM) for the management of applied research and development in consortium projects is to provide a concise and up-to-date approach in an easy-to-use format for the implementation of business, technological, environmental and social aspects in the area in which the project is planned and implemented. The BM should provide an analysis of these aspects, as well as an explanation of the links between them and the priority areas of the development work.

Business models are fundamentally linked to technological innovation, but their construction is essentially separable from technology. We define a business model as a system that solves the problem of identifying user needs, engaging with those needs, and delivering value satisfaction.

The BM construct is attractive to the academic community, but there is also a lack of a common language that would allow researchers to refer to the work of others. In this paper, we present one perspective on the BM construct for conducting applied research in the implementation of critical infrastructure security projects, with a focus on maritime security, and where this perspective leads us in terms of understanding the relationship between BM innovation and technical innovation.

While some researchers argue that the concept of BM is positioned in the traditional strategic terminology of competitive advantage, we argue that BM is a stand-alone concept and is consistent with the widespread assertion in the scientific community that it should create value.

Another important aspect of the scope of BM development is the protection of scientific research to ensure that it is not used in an unwanted way. Given that threats to scientific research are evolving and manifest in many forms, it is necessary to conclude that collective efforts are needed to develop research security resilience - the scientific and educational organizations that make up the consortium on a given project (in this case G7475) share the responsibility for identifying and mitigating security risks related to scientific research and development.

The purpose of this publication is to provide stakeholders an approach to managing critical infrastructure (CI) security research and development by developing and implementing a BM for research and development that establishes a management process, that allows identifying, assessing, and mitigating the security risks in a systematic, consistent, and documented manner.

Specifically, that will help research organizations to demonstrate how they can:

- ❖ develop and implement a series of personalized best practices for the implementation of scientific and applied research, which are both feasible and proportionate;
- ❖ identify and analyze the risks associated with the preparation and implementation of applied research projects in partnership conditions, and to determine the possible risks;

## 1. Business model

Collaborative research takes its place as a fundamental innovation process characterized by the building of relationships that create opportunities for gaining access to external sources of high technology and their integration into products and services developed in the interest of critical infrastructure security.

These activities refer to that part of BM that represents the ability to acquire knowledge, design, develop and improve products, services, technologies or processes. For scientific and educational organizations, research is the key to improving business skills, expanding the portfolio of products and services and maintaining applied research and development, in support of the security and protection of CI.

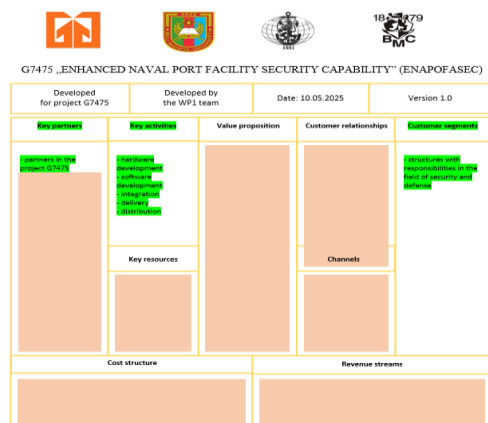
The creation and functioning of consortia plays a leading role in the planning, structuring and negotiation of mutually beneficial collaborations between universities, research institutes and various stakeholders in the field of security and defense, with the proper construction and functioning of appropriate business models playing a significant role in this regard.

The timely development of the BM is of particular importance for the proper functioning of project consortia and serves as a disciplinary framework that mediates between applied research, the technical and economic spheres, and ensures the connection of all activities during the development process. This is as important as the experiments that are carried out to assess the risks in the technologies. The role of the BM should become part of the new dominant logic for managing the commercialization of technologies.

The purpose of this paper is to present the impact of BM on two dimensions of collaborative research: collaboration, as an alternative to successful relationships, and risk sharing, as an effective tool for assessing the portfolio of opportunities for successful activity.



The preparation of a basic structure of BM for the management of research and applied scientific developments within the scope of the G7475 project is a stage of the work of the participants in it, and the following text will present to your attention the basic activities in the area of "key partners", "key activities" and "customer segments" (Figure 1).



**Figure 1:** BM of project G7475 focusing on key elements related to the topic.

In essence, BM consists of several key assumptions [1]:

- ❖ Every organization aims to create value for its stakeholders;
- ❖ The organization seeks to capture the created value through various revenue sources;
- ❖ Understanding the processes of value creation and value capture requires focusing on the organization, but also considering how it is included in a network of external organizations (creating a consortium);
- ❖ The products and services offered are inseparable from the operations and activities of the organization;
- ❖ The organization's management voluntarily decides how to manage its business.

Building key partnerships through the creation of project consortia allows the implementation of good practices, focusing on [1]:

- ❖ exploitation of research results through intellectual property rights and individual products;
- ❖ training of doctoral students;
- ❖ dissemination of research results through publications, conferences, etc.;
- ❖ stimulation of networking and knowledge transfer;
- ❖ acquisition of funding from international structures (including EU and NATO sources);
- ❖ provision of research infrastructure;
- ❖ provision of market information.

These good practices offer key insights for project management, namely:

- ❖ The consortium should be flexible in finding support and developing research projects with different funding mechanisms, for products and systems with different Technology Readiness Levels (TRL);
- ❖ The consortium should offer different types of services to foster collaboration between science and stakeholders (national agencies and industry);

- ❖ Developing international collaboration through contract applied research and development should be a strategic objective.

The following motivations for creating project consortia can be structured [1]:

- ❖ Optimization and economies of scale - a basic form of partnership through the creation of project consortia is designed to optimize the allocation of resources and activities, which leads to cost optimization and often includes infrastructure sharing.
- ❖ Reduction of risk and uncertainty - partnerships through project consortia help reduce risk in a competitive environment characterized by uncertainty.
- ❖ Acquisition of certain resources and activities - through project consortia, partners' own capabilities are expanded, as they rely on each other to provide certain resources or perform certain activities.

### 1.1 Business Model Framework

The main motives behind the development of the BM framework are related to the creation of a technological and business platform for a security system, through which to present the research management (Figure 1) for models developed under the terms of the G7475 project, with the participation of current partners.

Here, the main elements of the BM, directly related to the implementation of the scientific and applied activities under the G7475 project, will be indicated, and they are:

*Key partners* - when defining this component, the following opportunities were identified:

- ❖ suppliers of microelectronic elements, cloud services, etc.;
- ❖ partners under the G7475 project - with proven capabilities in the field of developing maritime infrastructure security systems; simulations of risky events underwater; ensuring sustainable two-way communication, etc.;
- ❖ business partners, national and international, with a portfolio in the field of maritime security and protection systems;
- ❖ national agencies with responsibilities in the fields of security, defense, education and science, economy;
- ❖ Patent Office of the Republic of Bulgaria.

*Key activities* – the scope of the identified key activities includes the following:

- ❖ hardware development: compatible with the security environment, lightweight, secure, through minimal modifications, ensuring operation in a maritime security environment;
- ❖ software development: intelligent software with capabilities for automated diagnostics of sensor devices; software for scenarios for the types of risk events and application support of the developed software;
- ❖ purchase of raw materials and electronic components, assembly, testing and packaging of products and systems;
- ❖ if necessary, integration of the developed systems or their elements in the terms of the business partners with whom there are agreements;
- ❖ distribution of the developed systems and products.

*Client segment* – the following potential stakeholders for the development and use of the security system have been identified:

- ❖ users from security structures;
- ❖ users from departmental and local administrations;



- ❖ operators of critical infrastructure;
- ❖ users from business organizations with a portfolio in the field of developing products and systems in the field of security and protection;
- ❖ users from academic and scientific organizations in the development of products and systems for security and protection.

This component of BM, as one of the most important, is at the same time one of the most difficult to define not only for products based on hardware and software, but also for those related to ensuring compatibility, including interoperability, with strategic management systems created and functioning at the national level.

### 1.2 Connection between the structured elements of the BM and the actual implementation of project G7475.

#### Key Partners

The key partners and stakeholders are preliminary approved by the funding body of the G7475 project, who will implement the activities in accordance with the "Work Plan".

#### Key activities

- ❖ Hardware and software for the line elements (Layer 1 to 3) are in the process of development (Figure 2);
- ❖ The ways of joint work on the project have been coordinated with the stakeholders;
- ❖ Information about the project G7475 has been published on the website of the lead partner - Institute of Metal Science Equipment and Technologies with Hydro- and Aerodynamics Centre "Acad. A Balevski" at the Bulgarian Academy of Sciences;
- ❖ 11 publications have been developed, which are within the scope of the project G7475 [2÷12].
- ❖ Integration into the information system of the stakeholders is not planned.

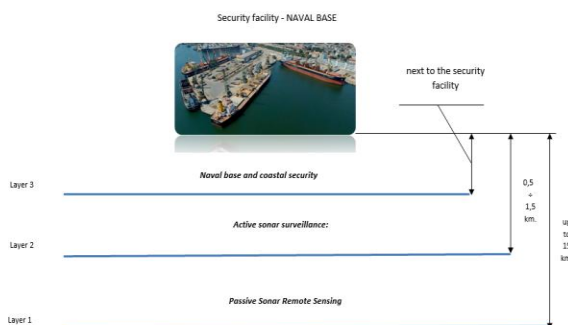


Figure 2: General scheme of project G7475.

#### Customer segment

The interested national structure for the creation of the maritime security system has been identified and approved by the funding organization of project G7475.

## 2. Relationship of BM with building resilience of critical infrastructure

According to ISO 22316:2017 [13], organizational resilience is the ability of an organization to absorb impacts and adapt to a changing environment. Therefore, resilience in CI [14] can be considered as a qualitative state that reduces vulnerability, minimizes the

consequences of threats, accelerates response and recovery, and facilitates adaptation to a disruptive event.

In this context, comprehensive knowledge of the operating conditions of the CI (operating environment, environmental and security environment) and of the main factors by which resilience is determined, limited and affected is the main prerequisite for strengthening the resilience of CI elements.

It is important to emphasize that organizational resilience is closely related to business continuity management [15]. This approach provides a practical framework for building an effective critical infrastructure management system, aiming to create protection and security against a wide range of potential threats and risk events.

Therefore, it can be said with sufficient reason that resilience of the CI is the inherent readiness of subsystems to be affected by a disruptive event. It is the ability of these subsystems to perform and maintain their functions when negatively affected by internal and/or external factors.

Considering the need to build sustainability of the functioning of the CI, we based our efforts on structuring the BM for managing scientific and applied developments under project G7475.

## 3. Conclusion

The presented structure of the BM for the management of scientific and applied developments within the scope of the G7475 project is based on the modern experience of the partners in the project consortium, who have achieved high efficiency in the field of scientific research and implementation of scientific products on the CI security market.

There are convincing reasons for developing their own BM, which requires a fundamental change in the way the consortium of organizations works and thinks. Therefore, the presented BM has an extremely high potential for sustainable increase in competitiveness and success.

Last but not least, the applied approach in the structuring and functioning of the G7475 project provides an opportunity for the proposed BM to ensure the competitive advantage of the key partnership between academic, university and interested organizations in the market implementation of the results of scientific and applied activities.

## Acknowledgment

This publication was carried out under project G7475, funded by the NATO Science for Peace and Security Programme.

## References:

- [1] Valeri Panevski. SOME ASPECTS OF ESTABLISHING KEY PARTNERSHIPS FOR DEVELOPING SECURITY SYSTEMS, Prof. Marin Drinov Publishing House of Bulgarian Academy of Sciences, 2025, ISBN:978-619-245-546-0, pages 158
- [2] I.J. Islamov, R.G. Akhundov, D. Dimitrov, V. Panevski. MODELING OF A CIRCULAR DISK MONOPOLE ANTENNA FED FROM A MICROWAVE BROADBAND COPLANAR WAVEGUIDE. Vol.7, 2, Advanced Physical Research, 2025, DOI - <https://doi.org/10.62476/apr.72184>, 184-185. SJR (Scopus):0.227;
- [3] I.J. Islamov, R.G. Akhundov, Y. Iliev, D. Dimitrov, V. Panevski. MODELING OF WAVE PROCESSES IN A BROADBAND HORN ANTENNA FOR TRANSMITTING AND RECEIVING RADIO FREQUENCY MICROWAVE SIGNALS. Advanced Physical Research, Vol.7, No.3, Advanced Physical Research, 2025, ISSN:2663-8436,

DOI:https://doi.org/10.62476/apr.73292, 292-303. SJR (Scopus):0.227;

[4] Aleksandar Kolarov, Radostin Najdenov “An approach to monitoring, classifying and jamming underwater sound communications”, TECHNICS. TECHNOLOGIES. EDUCATION. SAFETY. 2025 Proceedings year IX, ISSN 2535-0315(Print), ISSN 2535-0323 (Online) Issue 1 (18), pp. 160÷163;

[5] Bistra Nenova, “Sources of underwater ship noise”, TECHNICS. TECHNOLOGIES. EDUCATION. SAFETY. 2025 Proceedings year IX, ISSN 2535-0315(Print), ISSN 2535-0323 (Online) Issue 1 (18), pp. 139÷141;

[6] Ivanov I., Kolev St., Lolov M., Kosev V, “Visualization of underwater acoustic information received from a multibeam sector sonar”, TECHNICS. TECHNOLOGIES. EDUCATION. SAFETY. 2025 Proceedings year IX, ISSN 2535-0315(Print), ISSN 2535-0323 (Online) Issue 1 (18), pp. 147÷151;

[7] Valeri Panevski, SPECIFIC APPROACHES TO STRUCTURING A BUSINESS MODEL FOR SCIENTIFIC RESEARCH TO BUILD OF MARITIME CRITICAL INFRASTRUCTURE SECURITY SYSTEMS. Vol. 9 (2025), Issue 2, SCIENTIFIC TECHNICAL UNION OF MECHANICAL ENGINEERING INDUSTRY-4.0, 2025, ISSN:2535-0668; 2535-082X, 43-45;

[8] Chief Asst. B. Nenova, PhD „Frequency spectrum of underwater ship noise “, Proceedings of CONFSEC 2025, SCIENTIFIC TECHNICAL UNION OF MECHANICAL ENGINEERING INDUSTRY-4.0, YEAR 9, ISSUE 1 (11), ISSN PRINT, 2603-2945, ISSN ONLINE, 2603-2953, p.p. 109÷111;

[9] Ivanov, I., Kolev, S., Lolov, M. “Study of the Characteristics of a Hydroacoustic Antenna in a Marine Environment “, Proceedings CONFSEC 2025, SCIENTIFIC TECHNICAL UNION OF MECHANICAL ENGINEERING INDUSTRY-4.0, YEAR 9, ISSUE 1 (11), ISSN PRINT 2603-2945, ISSN ONLINE, 2603-2953, p.p. 107÷108;

[10] Radostin Naydenov, “Determining the sources of potential terrorist threats when building port defense systems”, Proceedings CONFSEC 2025, SCIENTIFIC TECHNICAL UNION OF MECHANICAL ENGINEERING INDUSTRY-4.0, YEAR 9, ISSUE 1 (11), ISSN PRINT 2603-2945, ISSN ONLINE, 2603-2953, p.p. 71÷73;

[11] Adalat Pashayev, Ramil Akhundov, Elkhan Sabziev, Tahir Alizada, Dimitar Dimitrov, Valeri Panevski. Detection of an Object in a Water Area Based on Vector Hydrophone Data. Journal of Electrical Systems, 22, 01, Engineering and Scientific Research Groups, 2026, ISSN:1112-5209, 134-142. SJR (Scopus):0.18.]

[12] Islam Islamov, Kalin Kalinov; Iliyan Y. Iliev, Ramil Akhundov; Vagif Gasimov; Boyan Mednikarov and Miroslav Tsvetkov, “Modeling and experimental study of loudspeaker directivity patterns in the far and near fields“, INTERNATIONAL JOURNAL OF MICROWAVE AND OPTICAL TECHNOLOGY, Volume 21, Issue 1, ISSN 1553-0396, pp. 21-28.

[13] ISO 22316:2017 Security and resilience – Organizational resilience – Principles and attributes

[14] Panevski, V. Critical infrastructure resilience assessment as a source of requirements for the security systems development. – Comptes rendus de l' Académie bulgare des Sciences, 77, 2024, No 12, pp. 1801–1807. ISSN: 1310-1331 (Print), 2367-5535 (Online). SJR (Scopus): 0.16 Q3 (Scopus);

[15] ISO 22301:2019 Security and resilience — Business continuity management systems — Requirements.

## Законова и административна рамка за използване на нелеталните средства в правоприлагането

Legal and administrative framework for the use of non-lethal means In law enforcement

Adelina Tumbarska

Institute of Metal Science, Equipment and Technologies with Hydro- and Aerodynamics Centre "Acad. A Balevski" – Bulgarian Academy of Sciences, Sofia, Bulgaria, E-mail: y.toumbarski@ims.bas.bg

**Abstract:** This report is based on an extensive review of international human rights law (IHL), law enforcement standards, other documents and good practices related to the use of non-lethal means in law enforcement. Drawing on the information from these sources, some considerations are proposed that could contribute to improving the legal and administrative framework for the use of non-lethal means in accordance with international human rights law.

**Keywords:** LAW ENFORCEMENT, HUMAN RIGHTS, NON-LETHAL WEAPONS

### Увод

Международното право създава редица правно обвързващи задължения за държавите относно правата на човека. Те включват задължения за създаване (или адаптиране) на национално законодателство в съответствие с международните норми, както и за въздържане от практики, които противоречат на тези норми. Вътрешното законодателство, политика и практика на държавите трябва да гарантират спазването на ключовите международни задължения и ангажменти относно правата на човека.

Основните функции на правоприлагащите органи са свързани с осигуряването на законност, ред и сигурност, при което те трябва да защитават и спазват и правата на гражданите. Същевременно, за да изпълняват задълженията си, тези органи имат правомощието да използват сила, когато е необходимо. Въпреки, че употребата на сила в дейностите по правоприлагане е добре регламентирана, често възникват ситуации, в които определените параметри могат да бъдат нарушени, а вследствие на това могат да бъдат засегнати и някои човешки права.

Докато употребата на огнестрелни оръжия в правоприлагането е ограничена законово само до ситуации, в които е застрашен човешки живот, все още има някои неясноти по отношение на това кога и как трябва да бъдат използвани нелеталните средства. Като се има предвид, че последните представляват основната част от оборудването на правоприлагащите органи, голямото разнообразие от такива средства, както и значителния им потенциал за извършване на злоупотреби, изясняването на тези въпроси е от съществено значение за законосъобразното и отговорно прилагане на сила.

Настоящият доклад е основан на обширно проучване на международното право в областта на правата на човека (МПЧ), правилата за правоприлагане, някои други документи и добри практики, свързани с използването на несмъртоносните средства в правоприлагането. На базата на информацията от тези източници са предложени някои съображения, които биха могли да допринесат за подобряването на правната и административна рамка за използване на нелеталните оръжия в съответствие с международното право за човешките права.

### Международни норми за използването на сила в правоприлагането

Основните международни инструменти за правата на човека, свързани с употребата на сила в правоприлагането, са: Всеобща декларация за правата на човека; Международен пакт за граждански и политически права; Конвенция срещу изтезанията и други форми на жестоко, нечовешко или унижително отношение или наказание; Кодекс за поведение на служителите на правоприлагащите органи (CCLEO), 1979, [1]; Основни принципи за използване на сила и огнестрелно оръжие от служители на правоприлагащите органи (BPUFF), 1990, [2]. Последните два са най-важните международни документи, служещи като стандарт за използването на сила в

право-прилагането, като предоставят насоки относно използването на сила от служителите на правоприлагащите органи.

Кодексът за поведение (CCLEO) гласи, че служителите на правоприлагащите органи могат да използват сила само когато е строго необходимо и до степента, необходима за изпълнение на техните задължения, а също така, че никое длъжностно лице не може да прилага или толерира какъвто и да е акт на изтезание или друго жестоко, нечовешко или унижително отношение или наказание. Според Кодекса „Като цяло, огнестрелни оръжия не трябва да се използват, освен когато заподозреният нападател оказва въоръжена съпротива или по друг начин застрашава живота на околните, и по-малко екстремни мерки не са достатъчни за неговото възпиране или задържане“. [1] Това означава, че използването на огнестрелни оръжия в дейността на полицията е приемливо единствено като крайна мярка.

Основните принципи (BPUFF) отразяват фундаменталния принцип, че служителите на правоприлагащите органи трябва да прилагат, доколкото е възможно, ненасилствени средства при изпълнение на задълженията си, преди да прибегнат до употребата на сила и огнестрелни оръжия. Те определят набор от параметри, в рамките на които служителите могат да използват сила и огнестрелни оръжия при изпълнение на своите функции, и забраняват използване на сила, което не отговаря на тези параметри и следователно е незаконно, произволно или прекомерно. За да могат да изпълняват задължения си съгласно изискванията, тези органи разполагат с набор от огнестрелни и несмъртоносни оръжия, всяко от които има различни цели и характеристики и може да предложи уникални предимства при специфични обстоятелства.

Основните принципи (BPUFF) насърчават правителствата да разработват и въоръжават служителите с оръжия, които биха позволили диференцирано използване на сила и огнестрелни оръжия, включително с нелетални средства. Основен принцип 2 призовава правителствата и правоприлагащите агенции да разработят „колкото е възможно по-широка гама от средства“, която „трябва да включва разработването на несмъртоносни оръжия за обезвреждане за използване в подходящи ситуации“. Принцип 3 призовава разработването и внедряването на несмъртоносни оръжия да бъдат „внимателно оценявани, за да се сведе до минимум рискът от застрашаване на незащитени лица“ и се посочва, че тяхното използване „трябва да бъде внимателно контролирано“ [2].

Част от международните актове са насочени към злоупотребата с правомощията на правоприлагащите органи. Те пряко свързват техните действия със спазването на правата на гражданите и най-вече с правото на живот, физическа и психическа неприкосновеност на личността, правото на достойнство и хуманно третиране на задържаните нарушители. Международните норми, обаче, не правят разлика по какъв начин е прилагана силата и какви средства са използвани за това. [3] С други думи, в много случаи изискванията за

използване на несмъртоносна сила и на огнестрелни оръжия са еднакви.

Важен и изключително полезен документ по отношение на несмъртоносните средства, е „Ръководство относно по-малко смъртоносните оръжия в правоприлагането“. Разработен от международна група експерти под ръководството на Службата на Върховния комисар на ООН за правата на човека, той запълва значителна празнина в тълкуването на основните човешки права и принципите на правоприлагане, предоставяйки на държавите, международните организации, гражданското общество и други заинтересовани страни насоки относно използването на несмъртоносните оръжия в съответствие с международното право. Този документ, както и няколко други документа, макар и да не са правно обвързващи, допринасят значително за превръщането на тези стандарти в закон, политика и практика.

### **Национално законодателство и разпоредби за използването на сила в правоприлагането**

В резолюция 38/11 Съветът по човешките права на ООН призовава държавите, „като приоритет, да гарантират, че тяхното вътрешно законодателство и процедури са в съответствие с техните международни задължения и ангажименти във връзка с употребата на сила в контекста на правоприлагането и се прилагат ефективно от длъжностните лица, изпълняващи правоприлагащи задължения, по-специално приложимите принципи на правоприлагането, като се има предвид, че смъртоносната сила може да се използва само като последна мярка за защита от непосредствена заплаха за живота“ [4].

На практика това означава, че всяка държава трябва да създаде адекватна правна и оперативна рамка със съответните правила и процедури, уреждащи кога и по какъв начин държавата има право да използва сила за целите на правоприлагането. Общите принципи за използването на сила, праговете за използване на смъртоносна сила, правилата относно отговорността, механизмите за контрол и надзор, трябва да бъдат определени в закон. Законодателството, регламентиращо дейността на правоприлагащите органи, трябва да бъде ясно, точно и достъпно за обществеността, подкрепено от ясни и достъпни разпоредби.

Изискванията по отношение на практиките на държавите се разпростират върху всички органи и лица, действащи от името на държавата, включително служителите на правоприлагащите органи, като крайната отговорност за действията на отделните длъжностни лица е на държавата. Операциите на тези органи трябва винаги да се провеждат в съответствие с националното законодателство и международните стандарти, залегнали в него. Независимо от съществуващата отчетност на национално ниво, това създава допълнителна отчетност на международно ниво, на което държавите носят отговорност за индивидуалните практики на своите длъжностни лица, както и за законодателните и други действия на своите органи, особено когато такива практики или действия представляват нарушение на правата на човека.

От всички правителства се изисква също да приемат необходимите мерки за инструктиране на служителите на правоприлагащите органи по време на основно обучение и всички последващи обучения, относно разпоредбите на националното законодателство в съответствие с Кодекса за поведение, както и за други основни международни стандарти за правата на човека, приложими за правоприлагането. Те трябва да бъдат спазвани при всякакви обстоятелства, като отклонение от тези стандарти не може да бъде оправдано с извънредни обстоятелства (напр. извънредно положение или друга извънредна ситуация). Тези стандарти трябва да бъдат отразени в националното законодателство и практика, а изпълнението им да се отчита пред обществеността.

В съответствие с принципа на законност, преди тяхното разгръщане всички силови инструменти трябва да бъдат подходящо тествани, надлежно разрешени и правоприлагащите власти трябва да разработят разпоредби или други насоки за

тяхното използване. Тези наредби трябва да се отнасят до инструмента (вкл. неговите боеприпаси, когато има такива) и до начина и обстоятелствата, при които се използва. Те също трябва да забраняват каквито и да било модификации на инструмента, целящи да го направят по-мошен. [5]

Известно е, че при неправилно използване (най-често поради недостатъчно обучение, избор на неподходящ инструмент или неспазване на инструкциите за използване), несмъртоносните оръжия могат да доведат до нарушаване на човешките права, наранявания и дори смъртни случаи. Освен това, с тези оръжия понякога се злоупотребява умишлено. За да се сведат до минимум рисковете от инциденти и злоупотреби, националното законодателство и разпоредби трябва да определят условията за използване на несмъртоносни оръжия и свързано с тях оборудване и да налагат нужните ограничения върху употребата им.

Придобиването и начина на използване на нелеталните оръжия се определят от политиките, протоколите и процедурите на съответния орган. Установено е, че органи, чиито политики и процедури насърчават използването на нелетални средства, заедно с подходящо обучение на служителите, което да гарантира правилното им използване, ще бъдат в състояние да предотвратят или свеждат до минимум физическите контакти, криещи значителни рискове за заподозрените и служителите, както и употребата на смъртоносни оръжия. Във връзка с обучението на служителите, в резолюция 25/38 [6] и резолюция 38/11 [4] Съветът по правата на човека насърчава държавите да полагат усилия за регулиране и създаване на протоколи за обучение и използване на несмъртоносни оръжия.

Приложени към нелеталните средства, тези изисквания означават, че държавите трябва да създадат правна и административна рамка, която да осигурява законосъобразност и отговорност във всеки етап от „живота“ на оръжието (Фиг. 1).



Фиг. 1. „Жизнен цикъл“ на нелеталните оръжия.

Принцип 3 от BPUFF възлага на държавите „внимателно да оценяват“ разработването и разполагането на несмъртоносни оръжия. Това изисква всеки нов нелетален инструмент за прилагане на сила да бъде щателно оценен, преди да бъде пуснат в употреба. За тази цел държавите трябва да създадат официален процес на оценяване на нови нелетални оръжия, включващо както оръжия в процес на разработване, така и съществуващи оръжия преди тяхното първоначално придобиване.

### **Процедура за оценяване на нелеталните средства**

Процесът на оценяване на нелеталните оръжия трябва да включва: Анализ на нуждите; Определяне на оперативните изисквания; Техническа оценка; Медицинска оценка; Въздействие върху правата на човека; Оперативни изпитания на ефективност. [7] Примерна процедура, включваща тези елементи, е представена схематично на Фиг. 2.

При оценяването на конкретно оръжие трябва да се вземе предвид рискът от злоупотреба с него, доколкото това е

възможно. При наличие на такъв риск или устройството трябва да бъде адаптирано така, че да не позволява злоупотреба, или ако това не е възможно - да се разработят насоки за предотвратяване на злоупотреби. Трябва да се проучат и допълнителните функции, с които могат да бъдат оборудвани оръжията, за да се прецени дали те са необходими и какви рискове представляват. Препоръчително е да бъде осигурено оборудване за цифрово или аудио записване на употребата на оръжието, за да се улесни евентуално разследване при инцидент, както и да се защити служителът от неправомерни обвинения.



Фиг. 2. Процес на оценяване на нелеталните средства.

Данните и информацията относно възможностите и функциите на оръжието, предоставени от производителите, не трябва да се приемат безрезервно. Задължително трябва да се извърши тестване на оръжието, независимо от производителя и в съответствие с признатите стандарти, преди предоставянето му на правоприлагащия орган. В резолюция 25/38 се подчертава значението на задълбочените и независими тестове на несмъртоносните оръжия „преди тяхното снабдяване и разполагане, за да се установи тяхната смъртоносност и степента на вероятните наранявания“ [6]. Тестването трябва да отчита напълно както изискванията, така и потенциалните възможности и ефекти на оръжията и трябва да се основава на безпристрастен правен, технически, медицински и научен опит и доказателства. Особено внимание трябва да се обърне на оценката на потенциалните ефекти от използването на оръжията спрямо лица, които могат да бъдат особено уязвими.

Несмъртоносни оръжия и свързано с тях оборудване, чието предназначение, очаквана или предвидена употреба не съответства на правилата, регулиращи правоприлагането, или които представляват неоправдан риск от загуба на живот или сериозно нараняване на когото и да било (заподозрени в престъпления, случайни минувачи или самите служители), не трябва да бъдат разрешени за снабдяване, разполагане или използване.

### **Някои съображения, свързани с нелеталните средства, предназначени за използване в правоприлагането**

При създаването на подходящ набор от закони, процедури и други, свързани с правоприлагането, освен описания процес на оценяване, биха могли да се имат предвид и следните съображения относно нелеталните оръжия.

#### **• Проектиране и производство**

Несмъртоносните оръжия и свързано с тях оборудване, предназначени за използване в правоприлагането, трябва да бъдат проектирани и изработени така, че да съответстват на законните цели на правоприлагането и на международното право за човешките права. Това задължение се отнася не само

до държавата и нейните органи, но и до фирмите, които разработват и произвеждат такива оръжия.

Производителите на нелетални оръжия трябва да представят на вниманието на купувача и/или потребителя и на обществото като цяло конкретните рискове, произтичащи от използването на оръжието. Обществено достъпните данни трябва да включват конструктивните характеристики и параметрите на всяко оръжие, с оглед улесняване на евентуално медицинското лечение и на общественото приемане. Производителите трябва също да публикуват данни от медицинските изследвания, свързани с анализите на безопасността. [9]

В процеса на проектирането трябва да бъдат взети предвид и някои други изисквания. Например, въпреки световните тенденции на все по-мощно разработване и използване на дистанционно управлявани оръжия, естеството на правоприлагането поставя някои ограничения относно прилагането на сила от разстояние. Една от причините за това е, че дистанцията може да намали значително потенциала за непосредствена оценка на ситуация, която изисква намеса на правоприлагащите органи (например, ареста на заподозрян в престъпление), което може да затрудни разрешаването ѝ по мирен начин. Ето защо, осигуряването на подходяща степен на човешки контрол върху използването на сила е от съществено значение при проектирането на нелетални оръжия за целите на правоприлагането. Следователно, оръжия, които доставят сила чрез дистанционно управление, автоматично или автономно, следва да бъдат разрешени само ако може да се гарантира, че тяхната предвидена или обичайна употреба ще бъде в съответствие с националното право и МППЧ.

#### **• Обществени поръчки и доставяне**

Решението за това какво оборудване да се закупи, трябва да се вземе задължително след консултации с крайния потребител, в случая конкретния орган, в зависимост от неговите функции. Например, оборудването на звена със специално предназначение не е подходящо за органи с по-обща задължения.

Препоръчително е да има централен списък с одобрено оборудване на национално ниво или за отделен правоприлагащ орган. Отговорността за закупуването на силови инструменти, избора на боеприпаси и разработването на насоки може да се носи от правоприлагащия орган или от съответното министерство. И в двата случая, за целите на отчетността трябва да бъде ясно посочено и за предпочитане установено по закон кой може да разрешава избора на оръжия и ще бъде отговорен за тяхното закупуване. [5]

Във връзка с тенденцията за придобиване на оборудване, разработено за военни цели, от правоприлагащи органи в някои страни, трябва да се подчертае, че такива оръжия са неподходящи за правоприлагането, тъй като използването им може да затрудни задължението за прилагане на минимална сила, а също и да има неблагоприятен ефект върху общественения имидж на тези органи. Ако подобни оръжия са необходими за конкретна ситуация, те трябва да се използват само от специално звено, обучено за работа с тях и под специален надзор.

Целият процес на възлагане на обществени поръчки следва да бъде поставен под ефективен надзор или демократичен контрол, който е независим от търговска, полицейска или политическа намеса и се състои от широк спектър от експерти, включително в областта на правата на човека, правото, медицината и гражданското представителство. Добра практика е целият процес на възлагане на обществени поръчки да бъде обект на експертна проверка и публикуване. [5]

#### **• Мониторинг**

Държавите и правоприлагащите органи трябва да наблюдават употребата и ефектите от всички нелетални оръжия, които те набавят, разполагат и използват в правоприлагането.



Мониторингът трябва да включва контекстуална информация за обстоятелствата на употреба. Съответните данни за тези, срещу които е използвана сила, трябва, доколкото е възможно, да бъдат разделени, например по възраст, пол, увреждане (ако има такова). Анализът на данните трябва да допринася за подобрения в обучението, насоките и политиката, когато е необходимо. Мониторингът трябва да включва проверки на място на нелетални оръжия и оборудване. [10]

Държавите и правоприлагащите органи трябва да си сътрудничат при наблюдението на употребата и ефектите на всички нелетални оръжия от външни органи за наблюдение, като национални институции за правата на човека, международни организации и организации на гражданското общество. Резултатите от такъв мониторинг трябва да се вземат предвид по време на обучението и при актуализирането на вътрешни политики или насоки. [9]

#### • **Прозрачност**

Държавите и правоприлагащите органи трябва да бъдат прозрачни по отношение на тяхното регулиране на използването на нелетални оръжия, както и политиките и критериите за тяхното законно използване.

Тази прозрачност следва да включва информация за рисковете, произтичащи от използването на такива оръжия или оборудване. Тя трябва да включва също обществено достъпна национална статистика за смъртни случаи и сериозни наранявания, свързани с различни категории несмъртоносни оръжия. Информация за инциденти вследствие използването на нелетални оръжия трябва да се споделя в правоприлагащите общности на национално, регионално и международно ниво.

#### • **Обучение**

Служителите на правоприлагащите органи трябва да бъдат обучени за законосъобразно използване на сила, което да включва: обучение по приложимите принципи и стандарти за правата на човека; за това как да се избегне използването на сила; за това как нелеталните оръжия могат да предложат по-безопасна и ефективна алтернатива на огнестрелните оръжия. Обучението трябва да бъде както базирано на сценарии, така и теоретично, и да включва управление на стреса в ситуации на използване на сила. Програмите за обучение трябва да се актуализират, за да се включат поуки, научени по време на операциите, и да се гарантира, че те отразяват всички съответни политики и вътрешни разпоредби. [10] Освен това държавите могат да потърсят техническа помощ от международни организации и правоприлагащи агенции от други страни.

Служителите на правоприлагащите органи трябва да получават подходящо първоначално и опреснително обучение за използването и въздействието на всяко нелетално оръжие, с което са оборудвани. Обучението трябва да включва информация за уязвимостта на определени категории лица към конкретно оръжие и за това как да се идентифицират особено уязвимите лица. Служителите трябва да бъдат запознати не само с основния риск от нараняване, произтичащ от използването на дадено нелетално оръжие, но и с вторичните наранявания, които могат да възникнат. Тези ефекти и рискове също трябва да бъдат отразени в стандартните оперативни процедури. Служителите трябва да бъдат специално обучени да се справят с нежеланите последиствия от използването на оръжията, за да могат да реагират адекватно, включително чрез оказване на първа помощ. Обучението трябва да включва и разясняване на необходимостта от събиране на данни от използването на оръжията, което ще идентифицира проблемите с безопасността и ще подпомогне анализа на ефективността на оръжията.

#### • **Трансфер**

Държавите трябва да регулират всички трансфери, вкл. износ и внос, на несмъртоносни оръжия в съответствие с техните международни задължения. Съгласно Договора за търговията с оръжия, държавите трябва да въведат процедури за оценяване, за да гарантират, преди разрешаването на

трансфера, че такива артикули не се използват за извършване или улесняване на сериозни нарушения на международното право. [11] Следователно, не могат да бъдат трансферирани нелетални оръжия, чиято предназначена, очаквана или планирана употреба: е равностойна на изтезание или друга форма на жестоко, нечовешко или унижително отношение или наказание; представлява неоправдан риск от нараняване или загуба на човешки живот.

### **Заклучение**

Международните задължения на държавите по отношение на човешките права включват ясно и подробно регламентиране на дейностите в правоприлагането, свързани с употребата на сила. Това налага създаването на (или адаптирането на съществуващото) национално законодателство, заедно със съответните административни мерки, политики, правила и процедури, които да гарантират в максимална степен спазването на човешките права от страна на правоприлагащите органи. В международното право оръжията не са разграничени на смъртоносни и несмъртоносни, от което произтичат някои неясноти, свързани с употребата на нелеталните средства. Представените тук обобщения и насоки могат да послужат както за подобряване на правната и организационната рамка за използване на сила в правоприлагането, която да бъде съобразена със спецификата на нелеталните оръжия, така и за тяхното положително възприемане от обществото, в контекста на правата на човека.

### **Използвана литература**

- [1] United Nations. Code of Conduct for Law Enforcement Officials. 1979. <https://www.ohchr.org/EN/ProfessionalInterest/Pages/LawEnforcementOfficials.aspx>
- [2] United Nations. Basic Principles on the Use of Force and Firearms by Law Enforcement Officials. 1990. <https://www.ohchr.org/en/professionalinterest/pages/useofforceandfirearms.aspx>
- [3] Генова, В., К. Колев. Използване на физическа сила от органите на полицията. [https://www.mvr.bg/docs/libraries/provi der62/default-document-library/e5c97c20-10\\_2011fizi4eskasi la.pdf](https://www.mvr.bg/docs/libraries/provi der62/default-document-library/e5c97c20-10_2011fizi4eskasi la.pdf)
- [4] United Nations. RES/38/11 The promotion and protection of human rights in the context of peaceful protests, 2018. <https://www.right-docs.org/doc/a-hrc-res-38-11>
- [5] United Nations. Resource book on the use of force and firearms in law enforcement, 2017. <https://www.ohchr.org/en/publications/policy-and-methodological-publications/resource-book-use-force-and-firearms-law>
- [6] United Nations. 25/38 The promotion and protection of human rights in the context of peaceful protests, 2014. <https://www.ohchr.org/sites/default/files/Documents/Issues/Executions/A-HRC-RES-25-38.pdf>
- [7] College of Policing. Use of force, firearms and less lethal weapons. UK, 2013. <https://www.college.police.uk/app/armed-policing/use-force-firearms-and-less-lethal-weapons>
- [8] Lawand, K. Reviewing the legality of new weapons, means and methods of warfare. International Review of the Red Cross, Vol. 88, No 864, 2006. <http://www.isodarco.it/courses/andalo13/doc/Reviewing%20the%20Legal%20New%20Weapons%20ICRC%202006.pdf>
- [9] United Nations, Guidance on less-lethal weapons in law enforcement, 2020. [https://www.ohchr.org/Documents/HRBodies/CCPR/LLW\\_Guidance.pdf](https://www.ohchr.org/Documents/HRBodies/CCPR/LLW_Guidance.pdf)
- [10] United Nations. Human Rights and Law Enforcement: A Trainer's Guide on Human Rights for the Police, 2002. <https://aceproject.org/ero-en/topics/elections-security/security-and-elections.pdf/view>
- [11] Human Rights and Law Enforcement: A Manual on Human Rights Training for Law Enforcement Officials, 2017. <https://digitallibrary.un.org/record/233530?v=pdf#files>

# Изграждане на многопластова система за противодействие на безпилотни летателни апарати в условията на съвременните предизвикателства пред сигурността

## Development of a Multi-Layered Counter-Unmanned Aircraft System for Addressing Contemporary Security Challenges

Марина Христова

„Институт по металознание, съоръжения и технологии с Център по хидро- и аеродинамика „Акад. А. Балевски“ – БАН

1574 София, България, бул. „Шипченски проход“ №67

marina.h@ims.bas.bg

**Abstract:** The rapid evolution of unmanned aerial systems (UAS) has introduced new security challenges, particularly with the emergence of FPV, autonomous, and fiber-optic drones. This paper analyzes the main categories of counter-drone systems, focusing on their capabilities and limitations. It demonstrates that effective protection requires a layered approach integrating detection, tracking, and mitigation technologies. The findings highlight that while radar, radio frequency, and electro-optical systems are essential for threat detection, kinetic countermeasures provide the most reliable solution against electronically resistant and autonomous drones. Therefore, a multi-layered counter-UAS architecture is essential for ensuring modern airspace security.

**Keywords:** UNMANNED AERIAL SYSTEMS, COUNTER-UAS, COUNTER-DRONE SYSTEMS

### 1. Увод

Безпилотните летателни системи бързо се развиха от нишови разузнавателни инструменти до средства на първа линия, използвани за наблюдение, насочване и директни атаки. С разширяването на възможностите на дроновете нараства и спешността за разполагане на надеждни системи за защита от дронове, способни да противодействат на все по-сложни заплахи. Съвременните противници разполагат със специално създадени дронове, предназначени да заобикалят традиционните защитни мерки, да използват електронни уязвимости и да действат в оспорвана среда. Тази промяна предизвика значителен напредък в технологиите за защита от дронове.

Днешните системи за защита от дронове трябва да се справят с широк спектър от заплахи, от търговски дронове, управлявани с радиочестотни лъчи, до електронно устойчиви платформи и автономни FPV дронове (всеки дрон с камера, предлагащ жива връзка със видеопредаване). В настоящата публикация се изследват най-критичните категории на съвременните системи за защита от дронове, как функционират те и защо многопластовите, кинетично способни решения се превръщат в съществена част от съвременната сигурност на въздушното пространство.

### 2. Предпоставки и начини за разрешаване на проблема

Разпространението на дронове коренно промени пейзажа на заплахите. Това, което някога беше евтино разузнавателно средство, се превърна в прецизна платформа, способна да събира разузнавателна информация, да води електронна война и да атакува кинетично.

С развитието на дроновете, еднослойните отбранителни стратегии не предлагат подходящата защита.

Съвременните системи за отбрана срещу дронове трябва да отчитат:

- ❖ Бързо маневриращи FPV дронове
- ❖ Платформи, защитени срещу радиочестотни заглушавания
- ❖ Автономна навигация и предварително програмирани полетни траектории
- ❖ Работа в отбранителни или оспорвани електромагнитни среди

Ефективната защита сега изисква интегрирани системи, които комбинират откриване, проследяване и смекчаване на последиците, често в множество области.

Преди да разгледаме конкретни системи, е важно да разберем трите функционални стълба, които са в основата на повечето стратегии за защита от дронове:

1. Откриване: Идентифициране на наличието на дрон с помощта на радар, радиочестотен сензор, електрооптични или акустични системи.
2. Проследяване и идентификация: Определяне на траекторията, типа и нивото на заплахата на дрона.
3. Смекчаване: Неутрализиране или деактивиране на дрона, преди да може да изпълни мисията си.

Въпреки че много системи се отличават с откриване или проследяване, смекчаването на рисковете остава най-предизвикателният (и решаваш) слой на защита, особено срещу електронно защитени заплахи.

Съвременните системи за защита от дронове не могат да разчитат единствено на смекчаване на въздействието. Откриването и проследяването остават критични за ранното предупреждение, класифицирането на заплахите и времето за

реакция. [1] Откриването без способност за реагиране обаче остава жизненоважни пропуски в сигурността на въздушното пространство. Срещу електронно устойчиви заплахи, като например фиброоптични дроневи и автономни дроневи, откриването трябва да бъде съчетано със слой за смекчаване, способен да действа незабавно въз основа на тази информация. В тези сценарии кинетичните решения осигуряват необходимия отговор, когато електронните инструменти са неефективни.

### **3. Изграждане на многопластова стратегия за защита от дроневи**

Никоя отделна технология не може да противодейства на всяка заплаха от дроневи напълно и самостоятелно. Най-ефективните системи за защита от дроневи разчитат на многопластови архитектури, които комбинират множество технологии, за да се справят с широк спектър от сценарии. Радарните и EO/IR системи осигуряват откриване и проследяване, радиочестотните инструменти остават ефективни срещу традиционните безжични дроневи, а кинетичните решения са насочени към радиочестотно-устойчиви и автономни платформи.

Този многопластов подход гарантира устойчивост, докато противниците се адаптират и технологиите за защита от дроневи продължават да се развиват.

### **4. Резултати и дискусия**

Съвременните заплахи от дроневи изискват многопластови системи за защита от дроневи, които комбинират откриване, идентифициране и смекчаване на последиците. Тъй като противниците внедряват FPV, автономни и оптични дроневи, разбирането как функционира всяка категория системи за защита от дроневи (и къде не са достатъчно добри) е от съществено значение.

Следните системи представляват основната технология за защита от дроневи, използвана днес:

❖ Системи за радиочестотно откриване и електронно противодействие

Радиочестотните системи формират основата на много традиционни системи за защита срещу дроневи. Тези решения наблюдават електронния спектър, за да откриват връзки за управление на дроневи и GPS сигнали. Радиочестотните системи са проектирани да идентифицират радиочестотно управлявани дроневи, да нарушават комуникациите за командване и контрол чрез заглушаване и да пречат на навигацията чрез подправяне на GPS сигнали. Въпреки че са ефективни срещу много потребителски и търговски дроневи, които разчитат на безжична комуникация, радиочестотните контрамерки имат ясни ограничения. [2]

Трябва да се отбележи, че радиочестотните системи са неефективни срещу дроневи с оптични влакна, не предлагат защита срещу предварително програмирани или автономни платформи и могат да бъдат влошени от претоварване на спектъра поради тактики за противодействие на електронна война на противника. В резултат на това, радиочестотните защити остават полезни срещу традиционните заплахи, но вече не са достатъчни като самостоятелни решения.

❖ Радарни системи за защита от дроневи

Радарните системи за защита от дроневи са адаптирани за откриване на малки въздушни заплахи на ниска височина, включително дроневи с минимално радарно напречно сечение. Тези системи осигуряват откриване на далечни разстояния, непрекъснато наблюдение на въздушното пространство и надеждна работа при всякакви метеорологични условия.

Въпреки това, радарните системи са изправени пред предизвикателства при разграничаването на дроневи от птици, отломки или други въздушни смущения и по своята същност не предлагат смекчаващ ефект. Без интеграция в по-широка рамка за реагиране, радарът служи предимно като инструмент за ранно предупреждение. За да функционира като цялостна защита, радарът трябва да бъде съчетан с ефективен неутрализиращ слой, способен да действа срещу откритата заплаха.

❖ Електрооптични и термични системи за откриване

Електрооптичните и термичните системи за откриване разчитат на сензори за визуален спектър и инфрачервени сензори, за да потвърдят и класифицират заплахи от дроневи. Тези системи са частично ценни за положителна идентификация и информирани решения за правилата за взаимодействие, предимно когато се използват заедно с радарни или радиочестотни инструменти за откриване. Въпреки силните си страни, сензорите за засичане на обекти (ЕО) и инфрачервените сензори могат да бъдат намалени срещу малки, бързо движещи се FPV дроневи. Подобно на радарните системи, те не предлагат директни възможности за смекчаване на заплахите, подобрявайки ситуационната осведоменост, но изисквайки интеграция с механизъм за реагиране, за да се спре заплахата.

❖ Системи за борба с дроневи, базирани на прехващачи и залавяне

Системите за защита срещу дроневи, базирани на прехващачи и залавяне, разчитат на физическо прихващане, а не на електронно смущение, за да неутрализират въздушните заплахи. Тези подходи включват дроневи, изстрелващи се в мрежа, устройства за залавяне, свързани с мрежа, и системи за механично прихващане, предназначени да ограничат или деактивират дрон физически. Такива системи могат да бъдат ефективни срещу платформи, със защита срещу радиочестотни вълни, и предлагат по-контролиран метод за неутрализиране в градска или чувствителна среда. Техният оперативен обхват и скорост обаче са ограничени, логистиката може да бъде сложна и те са уязвими към множество или високоскоростни заплахи. Въпреки че решенията, базирани на залавяне, могат да работят в специфични сценарии, те трудно се мащабират срещу съвременните FPV рояци или бойно ориентирани дроневи.

❖ Кинетични системи за защита от дроневи

Кинетичните системи за защита от дроневи представляват най-решаващия слой на съвременната технология за защита от дроневи, като физически деактивират дроневете чрез директно въздействие. Тъй като не разчитат на електронна намеса, кинетичните решения остават ефективни, независимо от метода на комуникация или автономността на дрона. Тази категория включва боеприпаси за борба с дроневи, платформи за прихващане на снаряди и други високоскоростни решения за неутрализиране на заплахи по време на полет.

За разлика от електронните контрамерки, кинетичната защита работи срещу дроневи с оптични влакна, автономни платформи

и предварително програмирани FPV атакуващи дроне. Тъй като противниците все по-често проектират дроне, за да заобиколят електронната защита, кинетичните системи са се превърнали в съществен компонент на съвременната архитектура за защита срещу дроне.

## **5. Заключение**

Електронната война отдавна е крайъгълен камък на противовъздушната отбрана, но фиброоптичните и автономни дроне разкриват нейните ограничения. Без радиочестотни сигнали, които да бъдат прекъснати, електронните контрамерки просто нямат какво да целят. В резултат на това защитите, разчитащи единствено на електронни решения, могат да се сблъскат с опасно фалшиво чувство за сигурност.

Кинетичната защита срещу дроне елиминира тази уязвимост, като директно неутрализира самата платформа. Тя не зависи от прекъсване на сигнала, софтуерни експлойти или електромагнитно надмощие; тя разчита на физическо взаимодействие. Тази промяна е особено очевидна в съвременни конфликтни зони като Украйна, където дроновете са проектирани специално да устояват на електронна атака. В среда като тази кинетичното взаимодействие вече не е пожелателно, а то е изискване.

## **6. Благодарности**

Настоящата публикация е изготвена в изпълнение на задача № 05.05 „Възможен подход за управление на процеса на разработване на решения за системи за сигурност“ от проект №5 „Технологии и системи за защита“ от Плана за НИД на ИМСТЦХА-БАН за периода 2026÷2028г.

## **Литература:**

- [1] Safaa Dafrallah, Moulay Akhloufi, Malicious UAV detection using various modalities, Drone Systems and Applications, Volume 12, 2024, Pages 1-18, ISSN 2564-4939, <https://doi.org/10.1139/dsa-2023-0049>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2564493924000134>);
- [2] J. Wang, Y. Liu, and H. Song, "Counter-Unmanned Aircraft System(s): State of the Art, Challenges, and Future Trends," IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, vol. 36, no. 5, pp. 4÷29, 2021. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9374654>.

# Application of virtual and augmented reality in radiation control training for nuclear power plant personnel

Dimitar Dimitrov, Nadejda Randelova

Institute of Metal Science Equipment and Technologies with Hydroaerodynamics Centre “Acad. A Balevski”, Bulgarian Academy of Sciences, Sofia, Bulgaria<sup>1</sup>

Kozloduy Nuclear Power Plant<sup>2</sup>

E-mail: NSRandelova@npp.bg E-mail: ddimitrov@ims.bas.bg

**Abstract:** This article analyzes the potential applications of virtual reality (VR) and augmented reality (AR) in radiation monitoring training for personnel at nuclear power plants. It examines the role of nuclear safety training, the importance of the human factor, the specifics of radiation monitoring and the potential of VR/AR technologies to improve staff training. A conceptual model and methodology for empirical research is proposed.

**KEYWORDS:** NUCLEAR FACILITIES, MODERN TRAINING TECHNOLOGIES, VIRTUAL REALITY, AUGMENTED REALITY, RADIATION CONTROL, TRAINING, NPP, NUCLEAR SAFETY

## 1. Introduction

In the context of digital transformation, technologies such as virtual and augmented reality are becoming increasingly important, as they enable the creation of realistic and safe training environments [1].

Development of nuclear energy is an important area of functioning of developed world countries. Nuclear power plants are objects of increased danger, so their development prospects are closely related to issues of safe operation and protection of territories, personnel, the environment on the territory of the station.

The safe operation of nuclear power plants is inextricably linked to the level of staff training. The International Atomic Energy Agency emphasizes that effective training and expertise maintenance are key prerequisites for nuclear safety [2].

## 2. Theoretical Foundations of Training and the Human Factor

Training at a nuclear power plant is a continuous process that encompasses initial training, maintenance of expertise, and periodic knowledge enhancement.

Use of virtual and augmented reality technologies for energy sector received positive approval from the world's leading countries and confirms its economic efficiency through:

- the reduction of cost and time costs of staff travel to facilities;
  - elimination of design errors before the beginning of the stage of construction and installation works;
  - increasing the level of industrial safety; improving the management of nuclear power plants.
- The Systematic Approach to Training (SAT) includes the analysis, design, development, delivery, and evaluation of training [3].
- The human factor remains a critical element of the safety of nuclear facilities.
- Effective training supports the development of competencies, reduces the likelihood of errors, and contributes to the formation of a safety culture [6].

## 3. Radiation Monitoring and Radiation Protection at Nuclear Power Plants

Radiation monitoring is a system of organizational and technical measures for observing and assessing the radiation situation.

Its primary objective is to protect the personnel, the public and the environment. According to the ALARA principle, radiation exposure should be kept as low as reasonably achievable [4].

Radiation monitoring includes individual dosimetric monitoring, workplace monitoring, monitoring of radioactive contamination, and radiation risk assessment as outlined in IAEA (2018) [5].

## 4. Limitations of Traditional Training

Traditional forms of training rely primarily on lectures, presentations, and limited hands-on exercises. They provide the necessary theoretical training but do not always allow for realistic simulation of emergency situations or work in high-risk conditions.

Practical training sessions are often limited by safety requirements and the need to minimize dose exposure.

Existing radiation control training programs are subject to the following limitations:

- Limited access to real radiation zones;
- Inability to simulate certain emergency scenarios;
- Risk of additional occupational dose exposure;
- Restricted opportunities for practical training of newly recruited personnel;
- High financial costs associated with conducting physical practical exercises.

## 5. Virtual and Augmented Reality

Virtual reality is a computer-generated environment in which the learner interacts with virtual objects and processes [7]. Augmented reality enhances the real environment by superimposing digital information onto real objects [8].

These technologies enable interactive learning, repeated practice of procedures, and the safe simulation of complex situations.

VR and AR can be used to simulate work in controlled areas, locate sources of contamination, use dosimetry equipment and respond to radiation incidents.

Through virtual scenarios, trainees gain practical experience without being exposed to actual radiation. AR supports task performance by displaying instructions and dose data in real time.

## 6. Conceptual Model

A model is proposed that includes five consecutive stages: theoretical training, VR simulations, AR support, practical assessment and analysis of results. The expected outcomes are the development of competencies, the enhancement of safety culture and the reduction of human errors.

The model links training to the ultimate goal – improving nuclear and radiation safety.

A model comprising four sequential stages is proposed:



Stage 1: Theoretical Preparation

Study of:

- Radiation protection;
- Dosimetric control;
- Emergency procedures;
- Regulatory requirements.

Stage 2: VR Training

Simulation of:

- Work in a controlled area;
- Radiological survey;
- Use of radiation monitoring instruments;
- Emergency scenarios.

Stage 3: AR Training

Real-environment visualization of:

- Radiation fields;
- Control checkpoints;
- Safe transit routes;
- Work instructions.

Stage 4: Evaluation and Analysis

Automated assessment of:

- Response time;
- Procedural compliance;
- Measurement accuracy;
- Decision making.

**7. Benefits and challenges**

One of the most important benefits of AR and VR in Radioactive Waste Management (RadWM) is improved safety. These technologies enable the simulation of hazardous scenarios, allowing personnel to train in a controlled, risk-free environment without the need to be physically present in dangerous or radioactive areas [9].

By reducing human exposure to radiation, AR and VR training programs significantly enhance worker safety. In addition, these technologies can be used to simulate emergency situations, providing personnel with the necessary skills and knowledge to respond effectively, without any risk of exposure to actual hazards.

Another key advantage of AR and VR is their enhanced efficiency. These technologies streamline the training process, allowing workers to gain practical experience without the need for physical equipment or facilities.

For instance, trainees can practice RadWM procedures in VR simulations, leading to faster and more effective skill acquisition. Moreover, the use of AR can assist in real-time guidance during maintenance and operational procedures, reducing downtime by 50% and enhancing operational efficiency.

Cost savings are another significant benefit associated with the use of AR and VR in RadWM. Traditional training methods often require physical resources, travel, and on-site exposure to hazardous environments, all of which incur high costs.

By utilizing AR and VR for training and simulation, companies can significantly reduce these expenses (reduction in training time for new technicians by up to 60%) while also minimizing the risk of accidents and equipment damage (overall maintenance cost reduction of 10–40%).

Furthermore, AR and VR can contribute to more efficient use of resources, such as reducing the need for physical materials and optimizing workforce management. Moreover, the use of AR and VR can lead to increased transparency in RadWM operations.

These technologies can be used for public outreach and education, offering the public immersive simulations of RadWM facilities and processes. By providing transparent access to the operations and safety measures involved in RadWM, AR and VR can help foster greater public trust and understanding.

Through virtual tours, educational programs, and community engagement initiatives, these technologies allow the public to gain insight into complex and sensitive areas of nuclear waste management, promoting informed decision-making.

Although the benefits of AR and VR in RadWM are clear, there are several challenges that must be addressed to ensure the successful integration of these technologies into the industry. One of the primary challenges is technical barriers. Developing high-quality VR and AR experiences requires specialized technical

A number of countries have already implemented projects to introduce VR training in nuclear plants

The training includes emergency scenarios, equipment replacement, and communication in stressful situations, with all parameters recorded and analyzed in real time.

Despite the obvious advantages, there are also challenges – the high cost of developing VR content, the need to update software, and the need for specialists to adapt curricula to the digital environment.

Therefore, the implementation of these technologies must be strategically planned and integrated into the overall training and qualification program systems, (IAEA, 2020) [4]

**8. Future directions**

1. Future development should prioritize the creation of standardized, high-resolution VR models of RadW storage and disposal facilities, incorporating real-time sensor data to enable proactive issue identification and predictive maintenance scheduling. This builds upon the benefits of improved safety and effectiveness already demonstrated.

2. Further efforts should focus on developing intelligent AR systems that integrate with existing maintenance databases and provide context-aware, step-by-step instructions, coupled with automated compliance checks to minimize errors and increase protection during complex tasks.

This directly addresses the need for enhanced precision and error reduction.

3. Future initiatives should establish collaborative VR platforms that allow for real-time stakeholder engagement and iterative design testing, incorporating feedback from safety and operational teams early in the design phase to avoid costly modifications during construction and optimize facility layouts for effectiveness and protection.

This moves towards more tangible improvements in design and planning.

4. Future research should focus on developing sophisticated VR simulation tools that can model a broader range of complex operational and emergency scenarios, incorporating predictive analytics and AI-driven risk assessments to augment preparedness and inform robust decision-making in RadWM.

This directly addresses the need for improved scenario analysis and risk mitigation.

**9. Conclusion**

The application of modern training technologies such as virtual and augmented reality, interactive simulators, and digital twins is a key

element in the development of modern staff training at nuclear power plants.

These tools not only improve the quality and effectiveness of training, but also contribute directly to increased safety by minimizing the human factor and improving coordination in real-life situations.

Combining technology and traditional forms of training creates a sustainable training model that supports the development of competent, confident, and responsible personnel - a key guarantee for the safe operation of nuclear facilities.

The VR and AR technologies rapid development has expanded the scope of their application, as follows [10]:

1. Application of VR and AR technologies for educational purposes.
2. VR and AR technologies application examples and trends in various industries.
3. VR and AR technologies application examples and trends for NPPs. The economic efficiency of using VR and AR for NPPs is achieved by eliminating design errors before the start of the construction phase, reducing time and costs for business trips of staff for staff professional development, increasing the level of industrial safety.
4. Peculiarities of application of VR and AR technologies for training of future specialists and advanced training of NPP personnel.
5. Application of VR and AR technologies for the popularization of professions in nuclear energy among children and youth. Due to VR and AR technologies, the issues of “nuclear energy safety” have gained new importance both for NPP personnel and for the training of future specialists in the field of nuclear energy.

## References

- [1]. Oleksandr Popov, Anna Iatsyshyn, Dmytro Sokolov, Maksym Dement, Ihor Neklonskyi & Alexander Yelizarov, Application of Virtual and Augmented Reality at Nuclear Power Plants, Systems, Decision and Control in Energy II, pp. 243-260.
- [2] IAEA (1996). Nuclear Power Plant Personnel Training and Its Evaluation: A Guidebook
- [3] IAEA (2002). Systematic Approach to Training
- [4] IAEA (2014). Radiation Protection and Safety of Radiation Sources
- [5] IAEA (2018). Occupational Radiation Protection
- [6] Salas, E., Tannenbaum, S. I., Kraiger, K., & Smith- Jentsch, K. A. (2012). The Science of Training and Development in Organizations
- [7] Stanney, K. M., & Hale, K. S. (2014). Handbook of Virtual Environments
- [8] Azuma, R. T. (1997). A Survey of Augmented Reality
- [9] Mohamed, A-MO, Mohamed, D, Fayad, A & Al Nahyan, MT 2025, 'Enhancing Radioactive Waste Management: The Role of Augmented and Virtual Reality in Training and Public Engagement', Green Energy and Environmental Technology, vol. 4, no. 1, pp. 1-35.
- [10] Oleksandr O. Popov, Anna V. Iatsyshyn<sup>1</sup>, Andrii V. Iatsyshyn, Valeriia O. Kovach, Volodymyr O. Artemchuk, Viktor O. Gurieiev, Yulii G. Kutsan, Iryna S. Zinovieva, Olena V. Alieksieiev, Valentyna V. Kovalenko<sup>1,7</sup> and Arnold E. Ki Immersive technology for training and professional development of nuclear power plants personnel

# Фундаменталната атрибутивна грешка на затворническите служители при бягствата на лишените от свобода

## The Fundamental Attribution Error of Prison Staff Regarding Inmate Escapes

Доц. д-р Маджаров, Емил  
Академия на МВР, София, България  
email: e.madzharov@abv.bg

Assoc. Prof. Madzharov, Emil, PhD  
Academy of the Ministry of Interior, Sofia, Bulgaria<sup>1</sup>

**Abstract:** The report presents a conceptual model for the interpretation of prisoner escape risks by penitentiary staff. It is based on the theory of the fundamental attribution error, according to which personal factors—such as abilities, motives, and intelligence—play a leading role in the assessment of people's behavior, at the expense of the significance of specific situations. The personality traits of different categories of correctional staff significantly influence their propensity to commit the fundamental attribution error when assessing, predicting, and mitigating the risk of escape among inmates.

**Keywords:** FUNDAMENTAL ERROR, ATTITUDES, MOTIVATION, EXTRAVERSION, NEUROTICISM, SELF-ESTEEM, SOCIAL DESIRABILITY.

### 1. Изследван проблем

Визията на Лий Рос относно фундаменталната атрибутивна грешка [5] послужи като допълнително теоретично основание при оформянето на личностно-поведенческата типология на служителите за интерпретация на техните действия при опити на затворниците за бягства. Според Рос хората са склонни „... да свърхатрибутират поведението на диспозиционните фактори (способности, мотиви, интелигентност) и да подценяват значението на ситуационните фактори“ [1]. В резултат на това бягството от пенитенциарното заведение може да бъде обяснено изцяло за сметка на личността на извършителя [2] и да се появи неадекватен стереотип на възприятие на неговите мотиви и намерения, тъй като напълно се игнорира ситуацията. Този деформиран начин на възприемане и оценка на бягството и на извършителя е сериозна пречка за подходящо реагиране по отношение на него. Следователно, и при бягствата от местата за лишаване от свобода [6] фундаменталната атрибутивна грешка влияе сериозно на поведението на служителите. Размерът на нейното проявление зависи от техните личностни качества, от утвърдените им поведенчески стереотипи, от техните нагласи към собствената им дейност и към лишените от свобода [3], от спецификата на конкретните служебни ситуации, в които те имат определена роля и участие.

Според сензитивността си към фундаменталната атрибутивна грешка пенитенциарните служители могат да бъдат разделени на следните групи:

**\*\*Формално-представителният, параден тип** пенитенциарни служители са с повишена екстравертност, социабилни, манипулативни, общителни. Те се отличават с нисък невротизъм, по-слаба тревожност, добре контролират собствените си емоции, бързо се разтоварват от стресови преживявания, а и съзнателно се стараят да избягват ситуацията с по-интензивни емоционални натоварвания. Психотизмът на служителите от анализирания персонаж е по-нисък. Те са умерени индивидуалисти, показват склонност към реалистични оценки, базиращи се на прагматични нагласи и демонстрират гъвкавост, приспособимост, както и бърза ориентация при промяна на обстановката. Техните показатели по скалата на лъжата са високи, тъй като разглежданият персонаж на служителите в местата за лишаване от свобода има по-голяма предразположеност към социално желателно поведение. Самооценката и самоуважението им са повишени, а тяхното самоподценяване е ниско;

**\*\* Служителите от рутинно-самосъхранителния тип** притежават ниска екстраверсия. Техният невротизъм е средно изразен или по-висок. Показателите им за лъжа или социално

желателно поведение са в диапазона от ниски до средни. Тяхната самооценка може да бъде характеризирана като ниска или средна. Средно е нивото на тяхната самоуважение, но самоподценяването им е високо. Служителите от рутинно-самосъхранителния тип имат ниско ниво на претенции, добър толеранс за работа в монотонни условия и ниска фрустрационна устойчивост. Те полагат усилия да избягват стресовите натоварвания, а в екстремална ситуация демонстрират неустойчиво поведение, слаба концентрация и склонност към панически реакции. Тази категория служители приемат примирително упреци и критика и не правят особени опити да се самооправдават. При тях е налице слабо изграден и ригиден комуникативен репертоар. Те последователно избягват в работата с лишените от свобода ситуацията, наситени с повече конфликти и директни агресивни реакции;

**\*\*Служителите от потребителско-хедонистичния тип** ще имат висока до средна екстраверсия, нисък невротизъм, психотизъм, който варира от нисък до среден, средно равнище на социално желателност (лъжа). Тяхната мотивация за постижения е в диапазона от ниска до средна, а самооценката и самоуважението им са на средно или високо ниво. Визираната категория служители се отличават с по-ниско самоподценяване. Те има умерено нисък толеранс към условията на монотония, съхраняват по-висока концентрация и превключваемост на вниманието, показват услужлива памет, отличават се със средна и висока устойчивост в екстремална ситуация, демонстрирайки инициативен и адаптивен стил на поведение. Служителите от потребителско-хедонистичния тип поемат отговорност и са предприемчиви в комплицирана ситуация, но действат прекалено рисковно, авантюристично и агресивно. Длъжностните лица от разглежданата категория избягват самооправданието, в определени граници търпят критика, но не показват, че са си извлекли поуки и отново действат прекалено решително и безотговорно. Представителите на потребителско-хедонистичния тип имат развити умения за общуване в рутинни и екстремални ситуации;

**\*\* Служителите от авантюристично-приключенския тип** имат висока екстраверсия, нисък невротизъм, среден или висок психотизъм, ниска или средна предразположеност към лъжа и осъществяване на социално желателно поведение. Те се отличават със средна или висока мотивация за постижения. Тя нараства при тях, когато те се окажат в комплицирана и екстремална ситуация. Разглежданата категория служители притежава висока, от нарцистичен тип самооценка, високо самоуважение и ниско самоподценяване. Служителите от авантюристично-приключенския тип имат нисък толеранс към работата в условията на монотония, отличават се с висока

фрустрационна устойчивост и ще предпочитат да са ангажирани в динамична, напрегната и високо стресова дейност. Техните действия в сложни моменти могат да бъдат адекватни и ефективни. Служителите от разглежданата категория са в състояние да поемат отговорност и инициатива.

## 2. Илюстративен материал

Служителите от формално-парадния, представителен тип поддържат по-висока наблюдателност, внимателно се вглеждат в поведението на всеки лишен от свобода. Те по-слабо споделят личностни оценки за бягствата, защото са интелигентни, автономни и се издвигат в по-лидерски позиции, в неформалното общуване. Техните невротично-спонтанни реакции на бягствата са по-умерени. Манипулативно могат да поддържат оценки за бягствата, съдържащи по-голяма фундаментална атрибутивна грешка, без реално да им се доверяват, като по този начин редуцират евентуалната отговорност и негативните последици от нея. Визирания категория служители не са склонни към прекалено опростени и регидни обяснения на причините за бягствата. Това се дължи на по-ниския невротизъм, психотизъм и повишено самоуважение, които им позволяват по-задълбочено да анализират трудно предвидимата ситуация и въпреки нейното наличие да не губят чувството си на контрол над текущите събития. Представителите на формално-представителния тип служители поради своята личностна зрялост, наблюдателност и добро самочувствие имат по-слабо хипертрофирана и генерализирана оценка за негативните личностни качества на лишените от свобода, което намалява вероятността за по-голяма фундаментална атрибутивна грешка при тях. Дори увеличаването на стажа и евентуалните наказания при служителите от разглеждания тип няма да повишат рязко размерът на фундаменталната атрибутивна грешка при тях. Затова ще допринесе и по-ниското ниво на техния бърнат синдром. Склонността на служителите от формално-представителния тип да не поемат отговорност в конкретни случаи на бягство, с които те персонално са свързани, могат да съдействат за увеличаване при тях на фундаменталната атрибутивна грешка. Те са по-слабо предразположени към позитивиране на оценките си за лишените от свобода в хода на ежедневното взаимодействие и комуникация с тях. Поради това служителите от формално-представителен тип по-внимателно ще отчитат текущите ситуации и в по-малка степен ще допускат фундаментални атрибутивни грешки.

Служителите от рутинно-самосъхранителния тип надценяват появата на аналогични ситуации при лишените от свобода, които в миналото си са извършвали бягства. Те игнорират спецификата на текущите моменти и се фиксират върху личностните качества на лишените от свобода, което е предпоставка за по-сериозни фундаментални грешки. Служителите от разглежданата категория трудно забелязват промените в ситуацията, предствляващи изключение от утвърдените правила. Подобна нагласа е резултат от привидната им дисциплинираност, зад която се маскира тяхната дезангажираност, нехайство, дефицит от бдителност в контактите с осъдените. Тези тенденции обуславят по-висок риск от атрибутивна грешка. Служителите от рутинно-самосъхранителния тип имат по-голяма сензитивност към внушенията от субкултуралното им обкръжение относно причините за бягствата на лишените от свобода, което спомага при тях за увеличаване на фундаменталните атрибутивни грешки. Рутинно-самосъхранителните служители са предразположени към по-интензивни невротично-спонтанни реакции по отношение бягствата на затворниците. Това се дължи на по-ниската им фрустрационна устойчивост и мотивация и на техния стремеж да не се натоварват с отговорности. Затова визираният тип служители

хипертрофират личностните характеристики на бегълците и подценяват ролята на ситуационните фактори. Представителите на рутинно-самосъхранителния тип предпочитат да атрибутират бягствата чрез личностните характеристики на бегълците, за да имат преживяването за контрол над ситуацията. Те в голяма степен игнорират значението на ситуативните променливи. По този начин по-добре съхраняват вътрешния си баланс и редуцират закономерно появяващите се вътрешни усещания за непредсказуемост и неуправляемост на ситуацията. Служителите от рутинно самосъхранителния тип притежават негативно-генерализирана личностна оценка за лишените от свобода. Тя се определя от ниската им мотивация за работа, от отсъствието на подходящи умения за комуникация с осъдените, от присъщият им по-голям невротизъм и самоподценяване. Тези персонални особености на служителите от разглеждания тип обуславят и възможността за повече атрибутивни грешки при тях.

Служителите от потребителско-хедонистичния тип се опитват да не надценяват ролята на аналогичните ситуации при лишените от свобода, които в миналото са извършвали бягства. Те с лекота ще могат да посочат потенциалните бегълци, защото бързо и интелигентно се ориентират в техните проблемни ситуации и отношения. Длъжностните лица от анализирания категория са хладнокръвни, с добра фрустрационна устойчивост, склонни към рискови действия. Тези техни личностни особености ги правят сензитивни към всякакви изключения от правилата за преценка и прогнозиране на бягства и намаляват при тях допускането на фундаментална атрибутивна грешка. Представителите на потребителско-хедонистичния тип са екстравертирани и комуникативни, поради което общуват с лицата, явяващи се носители на служебната субкултура. Те имат по-висока самооценка и самостоятелност и поддържат своята гледна точка за бягствата в различни ситуации. Затова и влиянието на служебната субкултура върху тях и по въпроса за бягствата е по-фрагментарно, а това понижава вероятността за фундаментална атрибутивна грешка. Служителите от потребителско-хедонистичния тип в значителна степен са освободени от невротично-спонтанните реакции по отношение на бягствата. Те не се натоварват особено и с вменената вина на целия персонал, свързана с отговорността за бягството. Това се дължи на по-ниската им мотивация за работа, на добрата им фрустрационна устойчивост, на неудовлетворените им претенции за по-голямо заплащане, на високата им самооценка и на техните по-развити нагласи за рисково и авантюристично поведение. Длъжностните лица от потребителско-хедонистичния тип избягват опростените и примитивни личностни обяснения на причините за бягствата и по-адекватно отчитат ролята на ситуационните фактори.

Служителите от авантюристично-приключенския тип не се нуждаят от наличието аналогични ситуации при определен лишен от свобода, който в миналото е извършил бягство, за да увеличат вниманието си към него. Те вживят във всеки осъден, и обвиняем потенциален извършител на бягство и са готови да анализират действията му в различни ситуации. Този подход на повишена бдителност при тях се дължи на адреналиновия им тип мотивация и на повишените им нагласи за рисково поведение. Анализирания категория служители последователно се придържат към правилото, че винаги има изключения. Ако един лишен от свобода не е извършил до момента бягство, това не означава, че в конкретен момент няма да го осъществи. В този смисъл всеки осъден е потенциален беглец. Това ориентира фокуса на интереса на служителите от авантюристично-приключенския тип към променящите се ситуации. Подобен подход към бягствата е свързан с нагласите им за търсене на приключения, с тяхната високата екстравертираност, самооценка и желание за самоизява в сложна рискова ситуация. Служителите от авантюристично-приключенския тип са едни от създателите на едномерните, регидни обяснения за бягствата, възпроизвеждани в

служебната субкултура, определящи всеки затворник като потенциален беглец. Появата на подобни оценки са свързани със свърхбдителност, която може да провокира не само възникването на фундаментална атрибутивна грешка, но и да иницира допълнително извършването на бягства. Визираният тип поведение на анализирания група служители се определя от тяхната рискова готовност, авантюристични нагласи, висок психотизъм и самоуважение. Те възприемат бягствата преди всичко като възможност за изява, а свързаната с тях отговорност не се перцептира като заплахата. При такъв подход на перцепция личностните особености на беглеца се разглеждат в контекста на ситуацията [4] По тези причини вероятността за фундаментална атрибутивна грешка намалява. Тази тенденция може да се представи като следствие от авантюристично приключенските нагласи, голямата екстраверсия, самооценка и от желанието за силова изява, при длъжностните лица от анализирания категория.

### 3. Заключение

Минимизирането на фундаменталната атрибутивна грешка, при всяка една от разглежданите категории пенитенциарни служители, изисква реализиране по отношение на тях на специфичен подход като се изхожда от присъщите им личностно-психологически особености. В този контекст бихме формулирали следните препоръки:

1. Представителите на формално-представителния тип пенитенциарни служители поради своята личностна зрялост, наблюдателност и добро самочувствие имат по-слабо хипертрофирана и генерализирана оценка за негативните личностни качества на лишените от свобода, което намалява вероятността за по-голяма фундаментална атрибутивна грешка при тях. Тези техни оценки и нагласи трябва да бъдат поощрявани и развивани. Дори увеличаването на стажа и евентуалните наказания, при служителите от разглеждания тип, няма да повишат рязко размерът на фундаменталната атрибутивна грешка при тях. Затова допринася и по-ниското ниво на техния бърнаут синдром, което следва да бъде целенасочено поддържано. Склонността на служителите от формално-представителния тип да не поемат отговорност в конкретни случаи на бягство, с които те персонално са свързани, могат да съдействат за увеличаване при тях на фундаменталната атрибутивна грешка, поради което този тип служебно поведение трябва да бъде ограничавано. Те са по-слабо предразположени към позитивизиране на оценките си за лишените от свобода в хода на ежедневното взаимодействие и комуникация с тях. Поради това служителите, принадлежащи към очертания формално-представителен тип по-внимателно отчитат текущите ситуации и в по-малка степен допускат фундаментални атрибутивни грешки. Подобна тяхна активност трябва да бъде стимулирана и да се изтъква пред другите служители като позитивен делови стандарт при работата с лишени от свобода, когато те се предлагат за помилване, предсрочно освобождаване, прекатегоризация и промяна на режима им на третиране в по-лек, извеждане на работа на външни неохраняеми обекти.

2. Следва внимателно да отчетем и по-голямо нарастване на фундаменталната атрибутивна грешка сред служителите от рутинно-самосъхранителния тип при увеличаване на техния стаж, възраст, бърнаут синдром и количество на наложените им служебни наказания. Върху тези тенденции в голяма степен са в състояние да влияят характерните за разглеждания тип служители интравертираност, по-ниско самоуважение и самооценка. Желанието им да избягат от отговорност може да повишат при тях размерът на фундаменталните атрибутивни грешки, но по-ниската им екстравертираност, агресивност,

самооценка могат да благоприятстват тяхното намаляване. Всички тези техни особености трябва да бъдат систематично отчитани в процеса на поставянето пред тях на ежедневни задачи и упражняването на контрол върху тяхната реализация, особено когато те работят с лишени от свобода, за които има основателни подозрения, че могат да реализират бягство от пенитенциарното заведение. Ежедневните контакти на служителите от рутинно-самосъхранителния тип с лишените от свобода следват да бъдат характеризирани като по-ограничени, ролеви и формални. Те се дължат на тяхната интравертираност, по-малка комуникативност, по-ниска самооценка, нежелание да се влиза в различни конфликти. Самите им контакти с осъдените значително ги натоварват и с основание те ги разглеждат като сериозен източник на негативни емоции и дискомфорт. Затова обаче служителите от рутинно-самосъхранителния тип не позитивират личностните характеристики на различните категории лишени от свобода, което и ги застрахова от допускането по-големи фундаментални атрибутивни грешки. Независимо от стремежа им да редуцират взаимодействието си с лишените от свобода, то следва да бъде поощрявано и интензифицирано, като внимателно се наблюдава при повишаване на служебната активност да не възникне по-голяма възможност и за реализация на фундаментална атрибутивна грешка, при оценка прогнозиране и интервениране по отношение на поведението на осъдените в различни ситуации.

3. Служителите от потребителско-хедонистичния тип са по-дистанцирани от самата служебна роля, имат по-високо самоуважение, запазват по-рационален поглед върху ситуацията, не се фрустрират от нейната непредсказуемост и динамичност. Техните личностни оценки за бегълците не са еднотонни и само негативни, а се отличават с по-голяма балансираност, многопластовост и амбивалентност. Подобен тип оценки сред представителите на потребителско-хедонистичния тип са резултат от тяхната екстравертираност, умения за общуване, по-висока самооценка и средно ниво на мотивация за работа. Длъжностните лица от разглежданата категория не увеличават фундаменталната атрибутивна грешка при интерпретиране на причините за бягствата на осъдените, дори когато нараства техния стаж и броя на наложените им наказания. Проявите на бърнаут синдрома при тях имат по-умерени измерения, тъй като те не са високо мотивирани, притежават по-нисък невротизъм, по-високо самоуважение и не се впечатляват особено от критика, контрол и санкции. При разглежданата категория служители по-високата екстраверсия, агресивност, самооценка и по-неизразените нагласи за отговорно поведение повишат възможността за допускането на фундаментална атрибутивна грешка. Следва се отчита и тенденцията тези личностни конструкти да имат по-умерено изражение и да са разположени в границите на средния диапазон. В този случай при служителите от потребителско-хедонистичния тип в по-малка степен те ще съдействат за нарастване на фундаменталната атрибутивна грешка. Нейните проявления могат да бъдат намалени при анализирания категория служители, когато се повишава тяхната мотивация, стимулира се тяхното отговорно отношение към работата и готовността им по-конструктивно да реагират на предоставяната им обратна връзка в рамките на субординационните интеракции. Бързината и редуцирането на контактите на служителите от потребителско-хедонистичния тип с лишените от свобода бе следвало да не породят позитивизиране на оценките за тях в личностен план. Това реално понижава риска от фундаментално атрибутивна грешка при тях. Представеният резултат при служителите от анализирания категория се определя от тяхната повишена екстравертираност, по-ниска мотивация за достижения, повишен егоцентризъм, изразени потребителски нагласи, по-формално изпълнение на рутинните задължения. Върху всички тези техни персонални особености трябва да се реализират целенасочени и систематични управленски интервенции от реките им



ръководители, за да се намали дистанцирането от деловите ангажменти и натоварвания без да се повишава готовността им за допускане на повече атрибутивни грешки при перцептирането и осмислянето на поведението на осъдените в рутинни и по-критични ситуации.

4. Служителите от авантюристично-приключенския тип би нямат изразена нужда от личностното атрибутиране на бягствата, тъй като за тях е от особена важност самата ситуация, адреналинът породен от нея и авантюристичните, несъобразени с риска действия за овладяването ѝ. При тях акцентът е изцяло върху динамиката на ситуацията. Анализирания група служители има по-слаба включеност в ежедневните, монотонни, рутинни дейности и ситуации, което не води до формиране на трайни негативни нагласи към личностите на лишените от свобода. Противопоставянето на служителите от разглежданата категория с тях е своеобразен хазарт, повдигаща адреналина игра, която е желана и подчинена на логиката на ситуацията. Затова се понижава шансът за допускане на фундаментална атрибутивна грешка, тъй като служителът с авантюристично-приключенски нагласи е рисков играч, търсещ опасни ситуации и нуждаещ се от опонент за тях. По тези причини много често той не е склонен да разглежда в негативен план личностните черти и качества на лишените от свобода. Смятаме, че наложените наказания и придобитият стаж не водят до покачване на фундаменталната атрибутивна грешка при авантюристично-приключенския тип служители. Бърнаут синдромът при тях е нисък и също съществено не влияе за повишаване на риска от възникването на фундаментална атрибутивна грешка. Появата на така представените резултати се дължи на високата самооценка, екстраверсия, психотизъм, авантюристични нагласи и ниска сензитивност към критика на длъжностните лица, идентифицирани в авантюристично-приключенската група. Очевидно, че мотивацията на служителите от авантюристично-приключенския тип опосредства и регулира проявите на екстравертираността, агресивността, високата самооценка. Смятаме, че при тях е водещо желанието за достигане на адреналиновите преживявания и тяхното получаване влияе на визираните личностни конструкти. Това в определена степен води до намаляване и на фундаменталната атрибутивна грешка. Предполагаме, че служители от авантюристично-приключенския тип се държат с лишените от свобода по-дистантно, агресивно и конфликтно. Затова можем да очакваме, че те няма да позитивират оценките си за тях в ежедневното взаимодействие, което ще понижава и възможността за появата на фундаментална атрибутивна грешка. Това тяхно поведение е резултат от тяхната мотивация, самооценка и ниво на психотизъм. В работата си с тази категория пенитенциарни служители трябва да се стараем да запазим по-ниската им предразположеност към фундаменталната атрибутивна грешка в процеса на по-пълноценното им и активно взаимодействие с лишените от свобода. При това трябва да се използва тяхната склонност за справяне с различни предизвикателства и трудности поради съпротивата на лишените от свобода и желанието им открито или конспиративно да противостоят на служителите от пенитенциарната администрация. Поставянето пред разглежданата категория служители на разнообразни задачи, предоставянето на кратки срокове за тяхното изпълнение, включването им в дейностите по овладяване на екстремални ситуации, естествено води до покачване на адреналина и усещането за интензивно пълноценно преживяване, което има своята значителна мотивационна функция. Подобен подход към представителите на авантюристично-приключенския тип позволява в максимална степен да се оползотвори тяхната мотивация от адреналинов тип като се съхрани и предразположеността им към по-малкото допускане на фундаментална атрибутивна грешка, защото те осмислят конкретната обстановка като актуално противопоставяне с лишените от свобода..

Личностно-психологическите особености на четирите типа служители имат твърде амбивалентно и противоречиво отношение към готовността им да реализират атрибутивна грешка при оценката, прогнозирането и неутрализирането на предразположеността на осъдените към бягство. Визираната амбивалентност и комплицираност на персоналните характеристики на служителите позволява реализацията на широк спектър от управленски интервенции, свързани със стимулиране, поощряване, супервизия, оказване на подкрепа, засилване на контрола и разширяване на кръга от поставяните задачи, при наличие на напрежение в отношенията с лишените от свобода и дефицит от време за реагиране. С помощта на представения кръг от управленски въздействия може да се оптимизира деловата активност на служителите и да се редуцира тяхната склонност към допускането на фундаменталната атрибутивна грешка в интеракциите и дейностите с лишените от свобода.

#### 4. Литература

1. Андреева, Л. Социално познание и междуличностно взаимодействие С. „Св. Кл. Охридски“, 2007, стр.75-76
2. Кондратьев, М.Ю. & Азбука социалного психолога-практика. М. „ПЕР СЭ“, 2007, (Кондратьев, М.Ю. & Ильин, В. А.), стр.42-43
3. Маджаров, Е. Пенитенциарна психология. част първа. С. „Албатрос“, 2016, стр.189
4. Маджаров, Е. Психологически състояния на извършителите при бягствата им от местата за лишаване от свобода. В: п/р Бояджиева, Ю. & Станков, Б. Сборник доклади от научната конференция „Приложната криминология в България“ на НБУ и БКА, София, 2022, стр.112-121.
5. Росс, Л. Человек и ситуация. Уроки социальной психологии. М. „Аспект Пресс“, 1999, стр.34-35 (Росс, Л. & Нисбет, Р.)
6. Трайков, Здр. Наказателно-изпълнително (Пенитенциарно) право на Република България. С. „Албатрос“ 2007, стр.141

# Тактически действия на роеве дроне, управлявани от изкуствен интелект в съвременни бойни действия: синергия с нови технологии и фокус върху блокчейн

## Tactical actions of drone swarms controlled by artificial intelligence in modern warfare: synergy with new technologies and focus on blockchain

Prof. Nikolay Radulov, D.Sc, New Bulgarian University  
[n.stefanov5@gmail.com](mailto:n.stefanov5@gmail.com),

**Abstract:** The article examines the tactical application of drone swarms controlled by artificial intelligence (AI) in the context of modern combat. It emphasizes the transition from isolated groups of drones to fully autonomous multi-agent systems that achieve an asymmetric operational effect through mass, saturation effect, and flexibility. The main focus is on the critical synergy between AI and contemporary communication and computing technologies to build a resilient and decentralized battlefield architecture. Particular attention is given to integrating blockchain technologies (DLT) as a fundamental “trust layer” in cyberspace.

**Keywords:** Drone swarms; Artificial intelligence; blockchain technologies; edge computing; cyber resiliency; additive manufacturing.

### 1. Въведение

Роевете от безпилотни летателни апарати (БЛА) представляват *многоагентни системи* (multi-agent systems), в които десетки до стотици платформи работят координирано за постигане на обща цел — разузнаване, смущение, примащване, нанасяне на удари, логистика или комбинирани мисии. В съвременните бойни действия „роевият“ подход е привлекателен поради ефекта на насищане (overmatch<sup>1</sup> чрез маса), гъвкавостта и възможността евтини платформи да създават непропорционален оперативен ефект<sup>2</sup>.

Критичният катализатор за преход от „група дроне“ към истински рой е изкуственият интелект (ИИ) — автономна навигация, колективно планиране, разпределено вземане на решения, адаптация към смущения и деградация на връзката. Едновременно с това роят е зависим от комуникации, киберустойчивост и доверие между възлите. Именно тук се появява потенциалът на блокчейн/разпределени регистри (DLT): управление на идентичности, удостоверяване на телеметрия/команди, проследимост на събития и автоматизирани политики чрез умни договори.

Настоящият материал е посветен на тактическите действия на ИИ-управлявани роеве в съвременни бойни действия, подчертава ролята на новите технологии (периферни изчисления, mesh networking<sup>3</sup>, 5G/6G, AR/VR интерфейси, автономни алгоритми) и анализира приложимостта на блокчейн като „слой на доверие“ в разпределена бойна среда.

<sup>1</sup> Означава да бъдеш по-силен, по-добър или по-велик от противника, което води до решаващо предимство или поражение. Терминът се прилага в общия английски език, военната стратегия, видеоигрите и финансирането на технологии

<sup>2</sup> Радулов, Н., Сигурност 4.0, София, 2019, НТС съюз по машиностроене ISBN 978-619-7383-15-7, стр. 50-102

<sup>3</sup> настройка на множество хардуерни възли, които работят заедно като една единствена Wi-Fi система. Използва един главен рутер, свързан с вашия модем, и допълнителни сателитни възли, разположени около вашето пространство. Те споделят едно име и парола, за да ви осигурят силен сигнал навсякъде.

### 2. Тактически модели на употреба на ИИ-управлявани роеве дроне

#### 2.1. Основни понятия и отличителни характеристики

Рой в военен контекст обикновено означава: голям брой платформи (десетки до стотици); децентрализирана координация (без единна точка на отказ); възможност за динамично присъединяване/отпадане на единици; колективно поведение (разделяне на роли, самоорганизация, колективно търсене/проследяване).

DARPA<sup>4</sup> описва визия за тактики с роеве до приблизително 250 малки БЛА/роботизирани системи за операции в сложна градска среда, с акцент върху интерфейс „човек-рой“ и бързо „проектиране“ на тактики според ситуацията.

#### 2.2. Ключови тактически действия и сценарии<sup>5</sup>

В реални конфликти и в концептуални разработки се очертават повторяеми тактически действия:

- Рой за ISR (Разузнаване, наблюдение, разпознаване - Intelligence, Surveillance, Reconnaissance) и „прозрачност“ на бойното поле. Роят разпределя сензорите си (EO/IR<sup>6</sup>,

<sup>4</sup> DARPA (Агенцията за перспективни изследователски проекти в областта на отбраната) е структура към Министерството на отбраната на САЩ, създадена през 1958 г. Тя отговаря за развитието на нови технологии с военно приложение, като залага на мащабни и рискови иновации.

<sup>5</sup> Drone Swarm Tactics: How Coordinated UAVs are Changing the Battlefield. October 2, 2025, <https://mgidefence.co.uk/drone-swarm-tactics-how-coordinated-uavs-are-changing-the-battlefield/>

<sup>6</sup> EO/IR означава Електрооптичен/инфрачервен. Това е комбинирана сензорна технология, която използва камери с видима светлина (електро-оптични) и термични сензори за откриване на топлина (инфрачервени). Тези двойни системи осигуряват 24-часово наблюдение, насочване и проследяване при всякакви метеорологични условия за военни, дроне и

акустични, RF<sup>7</sup>) за бързо покритие, откриване и класификация на цели. Децентрализираната архитектура позволява продължаване на мисията при загуба на отделни възли.

- Насищаща атака и преодоляване на ПВО/К-УАС (Counter-UAS<sup>8</sup>). Тактиката разчита на едновременно приближаване по различни траектории/височини, примамащи елементи и „разходни“ платформи, които изчерпват боеприпаси/канални за съпровождане.

- Рой като примамка/маскировка и електронно въздействие. Част от роя може да имитира радиопрофили, да излъчва смущения или да действа като ретранслатори, докато ударни елементи атакуват. В анализи на бъдеща употреба на роеве се подчертава важноста на електронната война и атака по командно-комуникационни системи.

- „Лов-удар“ (Hunter-Killer) с разпределено целеуказване. Една подгрупа открива и следи, друга атакува (loitering munitions, FPV<sup>9</sup>), трета оценява пораженията (BDA). ИИ подобрява устойчивостта при смущения чрез локално разпознаване на цели и автономна корекция в „последната миля“.

- Градски операции: блокиране на квартал/обект, претърсване на сгради, контрол на коридори. Това е централна линия в OFFSET: роят подпомага малки подразделения в сложни градски среди чрез бързо разгръщане, наблюдение и динамично адаптиране на тактики.

### 2.3. Тактическа логика: защо рой, а не „няколко дрона“

Роевете са привлекателни, когато: цената на отделна платформа е достатъчно ниска, че загубите са приемливи; ефектът се постига чрез маса, а не чрез „перфектна“ единица; противникът разчита на ограничени ресурси (радарни канали, боеприпаси, оператори, честотни ленти); комуникациите са оспорвани и се изисква автономност.

охранителни операции. <https://www.flir.com/discover/rd-science/what-is-eoir/>

<sup>7</sup> Радиочестотната (RF) технология при дроновете обхваща радиовълните, използвани за комуникация между безпилотния апарат и пилота. Тя служи за управление на полета, предаване на видеосигнал в реално време (FPV) и връзка с GPS сателити. [https://www.reddit.com/r/drones/comments/1gcyd7w/rf\\_detection\\_why\\_your\\_drones\\_radio\\_signals\\_are/?tl=bg](https://www.reddit.com/r/drones/comments/1gcyd7w/rf_detection_why_your_drones_radio_signals_are/?tl=bg)

<sup>8</sup> Системите за борба с безпилотни летателни апарати (C-UAS) са специализирани технологични пакети, предназначени за откриване, проследяване, идентифициране и неутрализиране на неоторизирани или враждебни безпилотни летателни апарати (БЛА). Тъй като нискотарифните дронаве променят съвременната война и заплашват критична гражданска инфраструктура, глобалният пазар на C-UAS се е увеличил драстично до многомилиардна рамка, съсредоточена върху многопластова, автономна противовъздушна отбрана. <https://sentrycs.com/glossary/counter-unmanned-aerial-systems-c-uas-counter-drone/>

<sup>9</sup> FPV (First-Person View или изглед от първо лице) е метод за управление на отдалечено превозно средство (най-често дрон) чрез камера на борда, която изпраща видео в реално време към специални очила или екран. Пилотът вижда всичко точно както ако се намира вътре в самата машина. <https://bgdrones.com/produkt-kategoriya/fpv-sistemi/>

Доклади, анализиращи концепции за бъдеща война, подчертават, че роевете превъзхождат единичните БЛА поради устойчивостта на откази, способността за насищане и гъвкавото разпределение на задачи.

## 3. Роля на изкуствения интелект в управлението на роя: автономност, командване и устойчивост<sup>10</sup>

### 3.1. Архитектури за автономност: централизирани срещу децентрализирани

В практиката се срещат три основни подхода:

1. Централизирано управление: един „мозък“ планира и разпределя задачи; силно уязвимо към заглушаване/унищожение на центъра.
2. Йерархично (leader-follower): няколко водещи възела; по-устойчиво, но лидерите са приоритетни цели.
3. Децентрализирано/роево: всеки възел изпълнява локални правила и обменя минимална информация; висока устойчивост, но сложност при верификация и предотвратяване на „приятелски“ конфликти.

### 3.2. ИИ функции по бойната верига

ИИ добавя стойност в почти всеки етап:

- Възприемане - разпознаване на обекти, класификация, сливане на сензори.
- Планиране и разпределение: Задачи (assignment) на роли (разузнаване/удар/ретранслация), покритие на райони, маршрути при заплаха.
- Контрол и навигация: избягване на препятствия, полет при липса на GPS, поддържане на формация.
- Кооперативно вземане на решения: локален консенсус кой да атакува, кога да се оттегли, как да се прегрупира.

Съвременни наблюдения върху бойното използване на дронаве сочат ускоряваща се интеграция на ИИ в целеуказването и повишаване на ефективността в силно оспорвани условия.

### 3.3. Човек-рой (Human-Swarm Teaming) и интерфейси<sup>11</sup>

<sup>10</sup> A Survey on UxV Swarms and the Role of Artificial Intelligence as a Technological Enabler, by Alexandros Dimos, Dimitrios N. Skoutas, Nikolaos Nomikos, Charalabos Skianis, 2025, <https://www.mdpi.com/2504-446X/9/10/700>

<sup>11</sup> The Human-Swarm Interface: Facilitating Effective Collaboration and Control in Collective Intelligence Systems, Gloria Bethg, <https://www.walshmedicalmedia.com/open-access/humanswarm-interface-facilitating-effective-collaboration-and-control-in-collective-intelligence-systems.pdf>

Критичен проблем е когнитивният товар: операторът не може ръчно да управлява десетки/стотици платформи. OFFSET предлага концепция за:

- интерфейси с AR/VR, жестове/глас/докосване;
- „граматика“ за описване на роева тактика (композируеми команди/поведения);
- бързо тестване на тактики във виртуална среда и пренасяне към реални експерименти.

### 3.4. Устойчивост при електронна война и разрушени комуникации

В силно заглушавана среда ИИ подпомага:

- локална автономност (мисията продължава при прекъсване на връзка);
- адаптивни маршрути и „тишина“ (LPI/LPD<sup>12</sup>);
- разпределено сливане на наблюдения (частични данни от много възли).

Тук се появява и синергията с mesh/MANET комуникации, където роят може да обменя данни без външна инфраструктура и да функционира „самостоятелно“ като мрежа.

## 4. Нови технологии и синергия: комуникации, периферийни изчисления, сензори, симулация и киберустойчивост

### 4.1. Mesh/MANET мрежи като „нервна система“ на роя

Децентрализираните mesh мрежи позволяват:

- мултихоуп маршрутизация (възел–възел–възел) при липса на „кула“;
- самоорганизация и самовъзстановяване;
- разделяне на задачи чрез обмен на локални оценки.

Fraunhofer IIS<sup>13</sup> описва подход с мобилна ad hoc mesh мрежа, където множество дроне обменят информация децентрализирано, без нужда от външна комуникационна опора

<sup>12</sup> LPI/LPD - Ниска вероятност за прихващане и ниска вероятност за откриване. Това са усъвършенствани техники за проектиране на радио и радарна комуникация, използвани във военните и отбранителните системи, за да скрият предавания от вражески сензори, единици за електронна война и вражески приемници за прихващане. <https://www.bluwireless.com/insight/lpd-lpi-stealth-tactical-communications/>

<sup>13</sup> Изследователите от Fraunhofer Institute for Integrated Circuits IIS описват и разработват иновативен подход за децентрализирана мобилна ad hoc mesh мрежа (MANet), насочен предимно към ефективното управление и комуникация на рой от автономни дроне (drone swarms) и цивилни роботи. [https://www.researchgate.net/publication/378119265\\_Ad\\_Hoc\\_Mesh\\_Network\\_Localization\\_Using\\_Ultra-Wideband\\_for\\_Mobile\\_Robotics](https://www.researchgate.net/publication/378119265_Ad_Hoc_Mesh_Network_Localization_Using_Ultra-Wideband_for_Mobile_Robotics)

— ключово при ограничено покритие или при разрушена инфраструктура.

### 4.2. Периферийни изчисления и разпределена обработка

За роеве са важни ниската латентност и устойчивостта при прекъсвания. Edge computing позволява: инференс „на борда“ или на близки edge възли (мобилен команден пункт, наземна станция, друг дрон); компресиране на обмена (изпращане на изводи, не сурово видео); баланс между енергийни ограничения и точност.

Съвременни научни разработки разглеждат интеграцията на агентни/многоагентни ИИ подходи с периферийни архитектури за мащабируема автономност и по-бързо вземане на решения.

### 4.3. Симулация, „виртуално тестване“ и ускорено развитие на тактики

Роевете са сложни нелинейни системи; реалните тестове са скъпи и рисковани. Визията на OFFSET включва виртуална среда („тактическа игра“) за:

- бързо генериране/еволюция на тактики;
- измерване на ефективност и сравнение;
- последваща проверка в реални експерименти.

Това се допълва от дигитални двойници (digital twins), синтетични данни за обучение и подсилващо обучение в симулация.

### 4.4. Киберрискове като тактически фактор

Роевете разширяват „повърхността за атака“:

- подмяна на команди (command injection);
- подправяне на идентичност (вражески възел се представя за „свой“);
- подмяна/фалшификация на телеметрия и цели;
- компрометиране на софтуерния supply chain.

За това киберустойчивостта не е само ИТ проблем, а тактическа предпоставка. Тук блокчейн може да бъде използван като механизъм за доверие/неподправяемост.

## 5. Блокчейн в роевете дроне: приложения, архитектури, ограничения и военна приложимост

### 5.1. Защо е ефективно приложението на блокчейн в рой: „слой на доверие“ в оспорвана среда

Блокчейн/DLT може да адресира типични слабости<sup>14</sup> на разпределени роли: идентичност и регистрация на възли: кой е

<sup>14</sup> Личева, Т., „Сигурност на данните с блокчейн технологията“ В. Сб. Док. от годишната научна конференция на ВТУ „Васил Левски“ – 8-9 юни 2023 г., стр.381-390, ISSN 2367-7481

„свой“ дрон; неподправяем лог на събития: телеметрия, заявки за цел, потвърждения; устойчиво споделяне на заплахи/индикатори: консорциумен регистър за киберситуационна осведоменост; умни договори: автоматизирани правила за допуск, роля, ограничение на употреба на сила, разпределение на ресурси.

Публикации разглеждат консорциумен блокчейн<sup>15</sup> за споделяне на данни за заплахи и координация на реакции в контекста на UAV роеве.

## 5.2. Конкретни приложения

- Управление на идентичност, достъп и доверие (IAM за роя). MDPI публикация предлага блокчейн-базирана децентрализирана рамка за формационно управление, интегрираща умни договори за регистрация и идентичност на БЛА.

- Защита на данни и устойчивост на подмяна. Научни публикации (напр. в *Computers and Electrical Engineering*) разглеждат блокчейн като механизъм за защита на данните в роя и подобряване на целостта/устойчивостта в реално време.

- Децентрализирано „гласуване“ и консенсус за решения. Вместо един контролер, възлите могат да потвърждават: кой възел е валиден; коя информация е приета за истина; коя мисия/план е активен.

- Логистика и „верига на доверие“ за боеприпаси/полезни товари. DLT може да подпомогне проследимост на полезни товари, резервни части и обновления (supply chain) — важно за предотвратяване на компрометирани компоненти.

## 5.3. Архитектурни модели

На практика „класически“ публичен блокчейн е неподходящ за бойни условия. По-реалистични са: permissioned/consortium DLT (валидатори са доверени възли — командни пунктове, edge сървъри, по-мощни дроне); йерархичен DLT: микро-регистри по подроеве, периодически „закотвяне“ (anchoring) към по-горен регистър; off-chain данни + on-chain хешове: големи данни (видео) остават извън веригата; във веригата се записват хешове и метаданни.

Съществуват и академични предложения за „combat drone swarm system“ върху конкретни блокчейн платформи, разглеждащи сигурност и управление на роя.

## 5.4. Ограничения и рискове на блокчейн подхода

- Латентност и пропускателна способност. Тактическите решения често са в диапазон милисекунди–секунди. Много консенсус алгоритми добавят закъснение.

- Енергийна цена и ресурсни ограничения. Малките FPV/мини-дроневи имат ограничен CPU/енергия; тежките

криптографски операции трябва да се изнесат към edge/мощни възли.

- Радиосреда и смущения. Ако комуникацията е прекъсната, консенсусът деградира; трябва да има режим на работа „degraded/offline“.

- Тактическа „подписаност“ (signature). Допълнителният обмен на пакети може да увеличи откриваемостта. Трябва да се оптимизира за LPI/LPD.

- Оперативна сигурност (OPSEC). Дори permissioned регистър може да създаде централизирани зависимости (валидатори/edge възли).

Блокчейн е най-полезен като слой за удостоверяване/проследимост и управление на доверие, а не като механизъм за управление на полета в реално време.

## 5.5. Синергия ИИ + блокчейн + edge/mesh

Практически перспективен модел: ИИ на борда: локално възприемане и кратко планиране; Mesh мрежа: обмен на „компактни“ събития и намерения; Edge възли (валидатори): поддържат permissioned регистър, изпълняват умни договори и разпределят роли; DLT: удостоверява идентичност, подписва мисийни политики, пази неизменим лог за следмисийна проверка.

Така се комбинират ниска латентност (чрез периферията) и доверие/устойчивост (чрез DLT), без да се налага блокчейн да носи целия товар на тактическите решения.

## 6. Адитивни технологии (адитивно производство) като фактор за повишаване ефективността на ИИ-управлявани роеве дроневи

### 6.1. Роля и мотивация: защо адитивното производство е релевантно за роя

Роевете от безпилотни летателни апарати (БЛА) са много-агентни системи, при които оперативният ефект често се постига чрез маса, разпределение на роли и устойчивост на загуби, а не чрез „перфектна“ единица. В този контекст адитивните технологии (адитивно производство/3D печат) се разглеждат като средство за ускоряване на цикъла „идея–прототип–полево внедряване“, за намаляване на логистичната зависимост и за оптимизация на конструкцията спрямо конкретни тактически мисии. Адитивното производство не е конкурент, а допълващ слой към вече разгледаната синергия ИИ + mesh/MANET + edge computing + киберустойчивост, като влияе върху: устойчивостта и ремонтно-пригодността на платформите; темпа на адаптация на роя към заплахи и среда; стандартизацията и модулността, улесняващи разпределение на роли и бързо прегрупиране.

### 6.2. Основни направления на приложение (use-cases) за роя

Адитивните технологии са най-полезни там, където роят изисква много бърза промяна на конфигурацията или

<sup>15</sup> Консорциумният блокчейн е полу-децентрализирана мрежа, в която правото да потвърждава транзакции и да управлява данните е предварително дадено на група от избрани организации, вместо да е напълно отворено за всеки или скрито само за една фирма.



поддържане на висока наличност при приемливи загуби на отделни възли.

- Леко теглови конструкции и оптимизация на платформата, чрез печат на сложни геометрии за рамата/корпуса, топологична оптимизация и намаляване на масата, което води до по-добра енергийна ефективност, маневреност и дълготрайност на мисията.

- Модулност и „мисийни пакети“; унифицирани монтажни интерфейси и адаптери за бърза смяна на полезен товар (EO/IR, RF, ретранслатори и пр.), позволяващи бързо пренастройване на роя спрямо мисията.

- Полеви ремонт и възстановяване на боеспособност; печат на корпусни детайли, крепежи и прости механични елементи на място, намаляващи зависимостта от доставки.

- Интеграция на елементи за защита и намаляване на подписа; персонализирани корпуси и montaje за поддържане на желаната компоновка на комуникационните и сензорните възли.

### 6.3. Влияние върху тактическите модели на употреба

Аддитивните технологии подобряват изпълнимостта на тактиките чрез ускорена адаптация и по-висока наличност на платформите. ISR рой се възползва от по-бърза подмяна/модификация на сензорни модули и корпуси; за градски операции се използват мисийно-специфични конфигурации; за противодействие на електронни заплахи — адаптивни и персонализирани montaje за защита на комуникационните възли.

### 6.4. Инженерни ограничения и рискове

Контрол на качеството и възпроизводимост; устойчивост на средата; сигурност на производствения канал; и съответните тестове за дълготрайност на компоненти при вибрации и удари. Аддитивното производство трябва да се интегрира с процедури за проследимост на версиите и сигурност на CAD-дизайна.

### 6.5. Синергия с киберустойчивост, edge и „слой на доверие“

Периферийните изчисления подпомагат полеовото производство и верификация на дизайни; киберустойчивостта защитава процеса на печат и изцяло производствената верига; DLT може да се разглежда като концептуален модел за проследимост на версии и произход на дизайн.

Аддитивното производство повишава ефективността на ИИ-управляваните роеве чрез по-лека конструкция, по-голяма функционалност и по-бърза адаптация към конкретни мисии. Ограниченията са в контрола на качеството, материалите и сигурността на производствения канал. Интегрирането на аддитивни компоненти трябва да върви заедно с по-строги протоколи за тестове и киберустойчивост.

## 7. Заключение

ИИ-управляваните роеве дроне променят тактическата картина чрез масовост, адаптивност и устойчивост на загуби, особено в оспорвани среди с електронна война и ограничени комуникации. Програмни визии като DARPA OFFSET подчертават нуждата от „човек-рой“ интерфейси и бързо проектиране и тестване на тактики, докато реалните тенденции показват ускорена интеграция на ИИ в целеуказването и автономността.

Синергията с mesh/MANET и edge computing е критична: тя дава ниска латентност, устойчивост при прекъсвания и разпределена обработка — ключови предпоставки роят да остане функционален без централизирана инфраструктура.

Блокчейн/DLT не е „магическо“ решение и не следва да се използва за управление на полета в реално време. Най-обещаващата му роля е като *слой на доверие*: идентичност и регистрация на възли, удостоверяване на събития/команди, неизменен лог, автоматизирани правила чрез умни договори и споделяне на данни за заплахи в консорциумна среда.

Перспективният път напред е архитектура, която комбинира автономен ИИ на борда, децентрализирани mesh комуникации и edge валидатори/командни възли, подкрепени от permissioned DLT. Така се получава практическа комбинация от скорост, устойчивост и проверимост — основата за надеждни роеви операции в бъдещите бойни действия.

## Библиография

### На български

1. Личева, Т., „Сигурност на данните с блокчейн технологията“ В. Сб. Док. от годишната научна конференция на ВТУ „Васил Левски“ – 8-9 юни 2023 г., стр.381-390, ISSN 2367-7481
2. Радулов, Н., Сигурност 4.0, София, 2019, HTC съюз по машиностроене ISBN 978-619-7383-15-7, стр. 50-102

### На английски език (Латиница):

3. AFCEA Signal. Blockchain Works With UAV Swarms, Researchers Say. <https://www.afcea.org/signal-media/technology/blockchain-works-uav-swarms-researchers-say>
4. A Survey on UxV Swarms and the Role of Artificial Intelligence as a Technological Enabler, by Alexandros Dimos, Dimitrios N. Skoutas, Nikolaos Nomikos, Charalabos Skianis, 2025, <https://www.mdpi.com/2504-446X/9/10/700>
5. Arshad, U. и др. (2025). Secure and optimized drone swarm operations with ... (ScienceDirect). <https://dl.acm.org/doi/10.1016/j.compeleceng.2025.110487>
6. Concepts for UAV Swarms in Future Warfare. Timothy Ditter, <https://www.cna.org/analyses/2025/10/prc-concepts-for-uav-swarms-in-future-warfare>

7. DARPA. OFFSET: OFFensive Swarm-Enabled Tactics.  
<https://www.darpa.mil/research/programs/offensive-swarm-enabled-tactics>
8. Drone Swarm Tactics: How Coordinated UAVs are Changing the Battlefield. October 2, 2025,  
<https://mgidefence.co.uk/drone-swarm-tactics-how-coordinated-uavs-are-changing-the-battlefield/>
9. Fraunhofer IIS (2026). How Mesh Networks Help Control Drone Swarms.  
<https://www.fraunhofer.de/en/press/research-news/2026/june-2026/innovation-from-above-how-mesh-networks-help-control-drone-swarms.html>
10. Li, H. и др. (2025). Secure Communication and Dynamic Formation Control of ... (MDPI Information).  
<https://www.mdpi.com/2078-2489/16/9/768>
11. Nguyen, T. M. и др. (2026). Agentic AI Meets Edge Computing in Autonomous UAV Swarms,  
<https://arxiv.org/abs/2601.14437>
12. The Human-Swarm Interface: Facilitating Effective Collaboration and Control in Collective Intelligence Systems, Gloria Bethg,  
<https://www.walshmedicalmedia.com/open-access/humanswarm-interface-facilitating-effective-collaboration-and-control-in-collective-intelligence-systems.pdf>
13. U.S. Army War College – War Room. Artificial Intelligence's Growing Role in Modern ...  
<https://warroom.armywarcollege.edu/articles/ais-growing-role/>
14. Vasylyshyn, S. и др. (2023). Combat drone swarm system (CDSS) based on Solana ..., <https://ceur-ws.org/Vol-3702/paper15.pdf>
15. Gloria Bethg, The Human-Swarm Interface: Facilitating Effective Collaboration and Control in Collective Intelligence Systems,  
<https://www.walshmedicalmedia.com/open-access/humanswarm-interface-facilitating-effective-collaboration-and-control-in-collective-intelligence-systems.pdf>

# Парадигма за сигурност на бъдещето. Сигурност X.0

## A paradigm for future security. Security X.0

Prof. Nikolay Radulov, D.Sc, New Bulgarian University

[n.stefanov5@gmail.com](mailto:n.stefanov5@gmail.com),

**Abstract:** The document outlines a radical paradigm shift in global and national security projected over the next 50 to 60 years, moving away from traditional physical borders toward a multidimensional ecosystem known as Security X.0. This future framework focuses on protecting human existence, cognitive integrity, and objective reality against decentralized and asymmetrical threats in a hyper-connected, synthetic world. A primary transition will be the move from reactive defense to "pre-security," where Artificial General Intelligence (AGI) utilizes predictive modeling to anticipate and neutralize cyberattacks or social conflicts before they occur. The author also anticipates a geopolitical shift where tech megacorporations usurp the state's monopoly on security, driven by their control over quantum computing and AI.

**Keywords:** Security X.0, Pre-security, Cognitive and Biological Sovereignty, Artificial General Intelligence (AGI), Blockchain & Cryptographic Reality, Q-Day

### 1. Въведение

В следващите 50 години концепцията за национална и глобална сигурност ще претърпи най-радикалната си трансформация от Вестфалския мир насам<sup>1</sup>. Футурологичната сигурност излиза извън рамките на традиционната военна и геополитическа защита, преминавайки към защита на самото човешко съществуване, познавателна цялост и планетарна екосистема. Сливането на биологичния, физическия и дигиталния свят ще създаде нови вектори на заплахата, които са асиметрични, децентрализирани и често трудно разпознаваеми. Този тип сигурност, следваща Сигурност 4.0<sup>2</sup>, 5.0 и пр., поради неопределения хоризонт наричам **Сигурност X.0**.

**Традиционните граници ще загубят своето значение**, тъй като основните заплахи ще се преместят в киберпространството, околоземната орбита, човешкия геном и дори човешкото съзнание чрез невро-интерфейсите. Тази статия разглежда фундаменталните основи и ключовите елементи на сигурността в хоризонта до 2070-2080 година.

**Радикалният преход ще е от защита на територии към защита на реалността** Класическият Вестфалски модел на сигурност, базиран на национални граници, физически армии и реактивни политики, навлиза в своя окончателен залез. През следващите десетилетия човечеството ще премине към футуристична архитектура на сигурността, дефинирана от

конвергенцията на Изкуствен интелект (ИИ), квантови изчисления, синтетична биология и невротехнологии<sup>3</sup>.

Новите парадигми в сигурността изискват пълно преосмисляне на това *какво* защитаваме, *от кого* го защитаваме и *кога* започва самата защита. Тук ще изследвам фундаменталните философски и структурни промени (парадигми), които ще дефинират сигурността в средата и края на 21-ви век.

### 2. От реактивна защита към алгоритмичен детерминизъм (Пре-сигурност)

Най-голямата промяна в доктрините за сигурност ще бъде преместването на фокуса от отговор на инциденти към тяхното математическо прогнозиране и предотвратяване. Системите вече няма да чакат възникването на кибератака или терористичен акт. Чрез всеобхватен анализ на данни, алгоритмичните системи ще предвиждат социални срывове и конфликти, създавайки парадигмата на *пре-сигурността*.

**.Предикативно всезнание:** Системите за сигурност вече няма да чакат възникването на кибератака, терористичен акт или пандемия. Чрез всеобхватен анализ на глобални данни, AGI (Общ изкуствен интелект) ще прогнозира социални срывове и индивидуални престъпления с изключителна точност дълго време преди те да се случат.

- **Парадоксът на изпреварващия удар:** Новата парадигма ще изисква създаването на етични и правни рамки за "неутрализиране на вероятности". Държавите ще нанасят превантивни удари (дигитални или кинетични) въз основа на алгоритмичен консенсус, че заплахата е неизбежна, променяйки дефиницията за "справедлива война".

<sup>1</sup> Концепцията за национална и глобална сигурност преживява най-радикалната си трансформация от Вестфалския мир (1648 г.) насам, като през 2026 г. се наблюдава оформянето на пост-вестфалски модел, в който суверенитетът на държавата е поставен под въпрос от технологични, хибридни и корпоративни фактори. Тази трансформация включва преминаване от отбрана на фиксирани териториални граници към защита на „дигитално пространство“, критична инфраструктура и информационни потоци, като същевременно влиянието на традиционните държавни актьори намалява за сметка на големи частни технологични компании. <https://unu.edu/publication/challenge-security-governance-changed-and-changing-international-system>

<sup>2</sup> Радулов, Н., Сигурност 4.0, Научно-технически съюз по машиностроене „Индустрия 4.0“ София, 2019

<sup>3</sup> Ienca, M., & Andorno, R. (2017). Towards new human rights in the age of neuroscience and neurotechnology. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28444626/>

Прилагането на прогнозни модели обаче крие сериозни рискове. Използването на алгоритми за легитимиране на превантивни удари (предемптивна употреба на сила) поставя остри етични въпроси за пропорционалност, алгоритмични пристрастия и отговорност<sup>4</sup>. Твърденията за абсолютна точност на Общия изкуствен интелект (AGI) следва да се разглеждат по-скоро като вероятен сценарий за бъдещето. Научно по-устойчиво е разбирането, че алгоритмите драстично ще влияят върху приоритизирането на рискове, без да гарантират абсолютен детерминизъм

### 3. Когнитивен и биологичен суверенитет

Традиционните граници (суша, въздух, вода, космос, киберпространство) ще бъдат разширени с два нови, изключително критични домейна: човешкото тяло и човешкият ум.

- **Невро-права и защита на съзнанието:** С масовото навлизане на интерфейсите "мозък-компютър", мислите, емоциите и спомените стават уязвими за външна намеса. Когнитивната сигурност ще се превърне във върховен приоритет – държавите ще трябва да гарантират, че решенията на техните граждани и лидери не са резултат от невро-хакерство или подсъзнателна микро-манипулация. Разпространението на невротехнологиите превръща човешкия ум в нова зона за конфликти. Това налага въвеждането на нови правни рамки за *невроправа* и *ментална поверителност*, които да защитават индивидите от несанкциониран достъп до техните мозъчни данни.<sup>5</sup> Защитата на *менталната цялост* става критична за предпазване на обществото от подсъзнателна манипулация и невро-хакерство.
- **Генетичната линия като критична инфраструктура:** ДНК на нацията ще се разглежда като най-ценния ресурс. Защитата от синтетични био-оръжия, създадени чрез CRISPR технологии<sup>6</sup> и насочени към специфични етнически или индивидуални генотипи, ще изисква създаването на постоянен планетарен био-радар и имунна защита на ниво държава.

<sup>4</sup> Downey, A. (2023). Algorithmic predictions and pre-emptive violence: artificial intelligence and the future of unmanned aerial systems. <https://pureportal.bcu.ac.uk/en/publications/neocolonial-visions-algorithmic-violence-and-unmanned-aerial-syst/>

<sup>5</sup> European Parliament Research Service. (2024). European Parliament Research Service Study. <https://www.europarl.europa.eu/at-your-service/en/stay-informed/research-and-analysis>

<sup>6</sup> CRISPR-Cas9 е революционна технология за прецизно редактиране на генома, базирана на естествен защитен механизъм на бактериите срещу вируси. Съкращението означава *Clustered Regularly Interspaced Short Palindromic Repeats* (Клъстерирани редовно разположени къси палиндромни повторения). Технологията действа като „молекулярна ножница“, която може да открива, изрязва и променя специфични ДНК секвенции в живи организми. <https://www.hostragons.com/bg/%D0%B1%D0%BB%D0%BE%D0%B3/crispr>

### 4. Приватизация на сигурността и възход на Мегакорпорациите

Монополът на държавата върху легитимното насилие и събирането на разузнавателна информация ще бъде необратимо нарушен<sup>7</sup>.

- **Технологичните гиганти като геополитически участници:** Корпорациите, които контролират квантовите компютри, орбиталните сателитни мрежи и алгоритмите на ИИ, ще разполагат с повече разузнавателна информация и изчислителна мощ от 90% от правителствата. Те ще се превърнат в суверенни доставчици на сигурност<sup>8</sup>.
- **Децентрализирана милитаризация:** Технологии, които някога са били достъпни само за суперсили (прецизни дронове, биологични агенти, кибер-оръжия), ще станат достъпни за дори за малки децентрализирани групи. Това създава парадигмата на *асиметричното масово унищожение*, при което малък брой индивиди могат да причинят щети от глобален мащаб.

### 5. Квантовият рестарт на тайната (Q-Day<sup>9</sup>)

Парадигмата на криптографската сигурност ще претърпи абсолютен рестарт в момента, в който квантовите компютри достигнат зрялост (така нареченият ден "Q").

- **Колапс на историческата конфиденциалност:** Всички текущи криптирани комуникации, финансови транзакции и държавни тайни, които в момента се прихващат и съхраняват от противникови служби, ще бъдат мигновено дешифрирани. Това ще предизвика безпрецедентна криза на доверието.
- **Квантово заплитане като нов стандарт:** Бъдещата сигурност на комуникациите ще разчита на законите на квантовата физика (Квантово разпределение на ключове). Опитът за прихващане на такава комуникация физически ще променя самите данни, правейки подслушването не просто трудно, а

<sup>7</sup> Mandel, R. (2000). *The Privatization Of Security*. <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0095327X0102800107>

<sup>8</sup> Vračević, N. (2025). Strategic Roles of Private Military Companies: The Evolution and Privatization of Warfare in the Context of Contemporary Global Conflicts. <https://contemporarysecuritystudies.com/journal/article/view/4>

<sup>9</sup> Q-Day е бъдещият момент, в който квантовите компютри ще станат достатъчно мощни, за да разбият сегашните стандарти за криптиране като RSA и ECC. Това събитие застрашава глобалната киберсигурност, финансовите системи и поверителността на данните, като принуждава държави и компании да преминат към нов тип защита. <https://www.ibm.com/think/insights/prepare-your-organization-for-q-day>

фундаментално невъзможно според законите на физиката.

## 6. От "Крепостна защита" към "Дълбока регенеративна устойчивост"<sup>10</sup>

Старата концепция за изграждане на непробиваеми стени (Firewalls, физически бариери) ще бъде заменена от парадигмата на биологичната имунна система.

- **Абсолютна презумпция за пробив:** Системите ще бъдат проектирани с очакването, че противникът *вече* е вътре. Фокусът се измества от предотвратяване на достъпа към минимизиране на щетите и светкавично възстановяване.
- **Самолекуващи се архитектури:** Кибернетичните и инфраструктурните мрежи ще използват ИИ, за да се пренаписват и реструктурират в реално време в рамките на атака. Подобно на живи организми, те ще изолират заразените "клетки" (сървъри или енергийни възли) и ще генерират нови пътища за функциониране без човешка намеса.<sup>11</sup>

## 7. Криптографска реалност и защитена истина

В ерата на хипер-реалистичните дълбоки фалшификации (*Deepfakes*) и генеративния ИИ, самата концепция за обективна реалност ще бъде подложена на атака.

**Доказателство за човечност<sup>12</sup>:** Сигурността ще изисква внедряването на хардуерни или квантови "водни знаци", които удостоверяват, че дадено видео, заповед или новина са създадени от реален човек, а не от алгоритъм.

**Информационна екология:** Информационното пространство ще се третира като околна среда. Целенасоченото разпространение на "алгоритмични халюцинации" и дезинформация ще се класифицира като форма на екологично замърсяване и акт на война, изискващ строга "информационна хигиена".

**Блокчейн:** Във футурологичен план, ролята на блокчейн радикално надхвърля съвременните финансови или логистични приложения, превръщайки се в екзистенциален

гарант на самата обективност. В предстоящата епоха на свръхразвит генеративен изкуствен интелект, автономни алгоритми и напълно синтетични светове (метавселени), човешките сетива окончателно ще загубят способността си да различават автентичното от симулираното. Епистемологичната криза на бъдещето няма да бъде липсата на информация, а невъзможността да се докаже нейният произход; В този свят криптографската реалност ще се превърне в основната надеждна „котва на истината“<sup>13</sup>. Блокчейн архитектурата ще функционира като базов *протокол на реалността* за дигиталната цивилизация. Чрез механизми за криптографско удостоверяване и концепции като „Доказателство за човечност“ (*Proof of Humanity*), мрежите на бъдещето ще валидират в реално време дали дадено събитие, съобщение, новина или дигитален аватар принадлежи на биологичен индивид или е продукт на изкуствен интелект; С развитието на технологията, „Машината на истината“ ще прерасне в глобален, децентрализиран „екзокортекс“ (външен мозък) на човешката история. Интелигентните договори (*smart contracts*) и Децентрализираните автономни организации (*DAOs*) ще еволюират в нови форми на алгоритмично обществено управление — системи, в които правилата и законите са самоизпълняващ се прозрачен код, имунен на политическа корупция и манипулация; В своята крайна футурологична форма, блокчейн няма просто да записва транзакции. Той ще бъде абсолютната защита срещу оруелски сценарии за пренаписване на миналото. Той ще осигурява неизменен дигитален хронограф на човешката цивилизация, превръщайки обективните факти и историческата памет в криптографски защитени артефакти, съхранени за вечността.

Бъдещето на сигурността няма да зависи толкова от създаването на по-големи оръжия, колкото от изграждането на етични, алгоритмични и биологични имунни системи, способни да защитят самата същност на това, което ни прави хора.

## 8. Заключение

Изследването категорично очертава, че до 2080 г. концепцията за сигурност ще претърпи най-дълбоката си метаморфоза в историята на човешката цивилизация. Традиционните доктрини, основани на физически граници, кинетични оръжия и реактивни мерки, ще отстъпят място на една напълно нова, многоизмерна и невидима архитектура. Сигурността вече няма да бъде просто щит срещу външни заплахи, а сложна, проактивна и дълбоко интегрирана екосистема, чиято основна цел е да съхрани самата същност на човешкото съществуване в един хиперсвързан и синтетичен свят.

Преходът към алгоритмична сигурност, управлявана от Общ изкуствен интелект (AGI) и анализ на големи данни, ще превърне математическото предвиждане в основен инструмент за защита. Заплахите ще бъдат неутрализирани изпреварващо, преди изобщо да се материализират във физическата или дигиталната реалност. Успоредно с това, фронтната линия се измества драматично към най-интимните пространства на човека — неговия ум и генетичен код. Утвърждаването на когнитивния и биологичния суверенитет се превръща в

<sup>10</sup> Deep Resilience

<sup>11</sup> Obinna Johnphill, Ali Safaa Sadiq, Omprakash Kaiwartya, and Mohammed Adam Taheir2. (2026). Cross: a cloud-native approach to automated remediation and self-healing in cyber-physical systems. <https://link.springer.com/article/10.1186/s42400-026-00549-8>

<sup>12</sup> Децентрализиран протокол за идентичност

- **Функция:** Система, базирана на блокчейн, предназначена да предотвратява бот рояци и фалшиви акаунти (Sybil атаки), като доказва, че дадено действие или самоличност принадлежат на уникален жив човек.
- **Механизъм:** Комбинира подаване на профили, видео/биометрично валидиране и социално потвърждаване в мрежи като Ethereum.

<sup>13</sup> Личева, Т., „Сигурност на данните с блокчейн технологията“ В. Сб. Док. от годишната научна конференция на ВТУ „Васил Левски“ – 8-9 юни 2023 г., стр.381-390, ISSN 2367-7481



критичен приоритет, тъй като невро-хакерството и синтетичните био-оръжия носят безпрецедентни екзистенциални рискове. Защитата на невро-правата и ДНК ще наложи отхвърлянето на модела на „непробиваемата крепост“ и възприемането на концепцията за дълбока регенеративна устойчивост – системи, които функционират като биологична имунна система със способност за автономно самолечение и адаптация при неизбежни пробиви.

Тази нова парадигма ще пренапише и правилата на глобалната геополитика. Държавният монопол върху сигурността ще бъде безвъзвратно споделян или дори напълно изнет от технологичните мегакорпорации, които единствени ще разполагат с необходимата изчислителна мощ и масиви от данни. В този контекст, наближаващият квантов преход (Q-Day) ще обезсили напълно съвременната криптография, налагайки спешното изграждане на квантово-базирани мрежи, чиято сигурност е гарантирана от самите закони на физиката.

Освен технологичните и биологични предизвикателства, материалът откроява една фундаментална криза на бъдещето – кризата на обективността. В епоха, доминирана от изкуствено създадени реалности и дълбоки фалшификации, борбата за истината ще бъде основен вектор на сигурността. Утвърждаването на „криптографска реалност“ чрез децентрализирани блокчейн мрежи и въвеждането на протоколи като „Доказателство за човечност“ (Proof of Humanity) ще бъдат единствените надеждни механизми за запазване на доверието в обществото.

В крайна сметка, сигурността на бъдещето няма да се измерва с дебелината на стените или мощта на оръжията, а с еластичността на системите и етичните рамки, които ги управляват. Предизвикателството пред човечеството няма да бъде просто да оцелее технологично, а да запази своята хуманност, свободна воля и познавателна цялост. Бъдещата парадигма за сигурност е преди всичко философски и морален императив – ангажимент за изграждане на устойчив свят, в който върховите технологии служат като абсолютен гарант на човешкото достойнство и обективната реалност, а не като инструмент за тяхното заличаване.

## Библиография:

### На български

1. **Личева, Т.**, „Сигурност на данните с блокчейн технологията“ В. Сб. Док. от годишната научна конференция на ВТУ „Васил Левски“ – 8-9 юни 2023 г., стр.381-390, ISSN 2367-7481

2. **Радулов, Н.**, Сигурност 4.0, Научно-технически съюз по машиностроене „Индустрия 4.0“ София, 2019

### На английски

1. Downey, A. (2023). Algorithmic predictions and pre-emptive violence: artificial intelligence and the future of unmanned aerial systems. <https://pureportal.bcu.ac.uk/en/publications/neocolonial-visions-algorithmic-violence-and-unmanned-aerial-syst/>

2. European Parliament Research Service. (2024). European Parliament Research Service Study. <https://www.europarl.europa.eu/at-your-service/en/stay-informed/research-and-analysis>

3. Ienca, M., & Andorno, R. (2017). Towards new human rights in the age of neuroscience and neurotechnology. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28444626/>

4. Mandel, R. (2000). The Privatization Of Security. <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0095327X0102800107>

5. Vračević, N. (2025). Strategic Roles of Private Military Companies: The Evolution and Privatization of Warfare in the Context of Contemporary Global Conflicts. <https://contemporarysecuritystudies.com/journal/article/view/4>

6. Obinna Johnphill , Ali Safaa Sadiq , Omprakash Kaiwartya, and Mohammed Adam Taheir2. (2026). Cross: a cloud-native approach to automated remediation and self-healing in cyber-physical systems. <https://link.springer.com/article/10.1186/s42400-026-00549-8>

# POST-QUANTUM SECURITY OF BLOCKCHAIN

## ПОСТКВАНТОВА СИГУРНОСТ НА БЛОКЧЕЙН

Д-р Личева, Т.

НТС, секция Техническа сигурност

teodora.licheffa@abv.bg

**Abstract:** The advent of quantum computers poses a serious threat to modern information security, and in particular to classical blockchain systems such as Bitcoin and Ethereum. These new machines possess enormous computing power, which, through specific algorithms, can easily break the cryptographic protections widely used today, based on factorization and discrete logarithms.

To counter this critical vulnerability, a new generation of protection, called post-quantum cryptography, is being actively developed. Leading international institutions are already creating standards and regulatory frameworks to facilitate the so-called „cryptographic migration“. The successful transition to a quantum-resistant era requires the implementation of „cryptographic flexibility“ and hybrid models that guarantee the long-term security and immutability of decentralized blockchain ecosystems.

**Keywords:** DATA SECURITY, QUANTUM COMPUTERS, BLOCKCHAIN, POST-QUANTUM CRYPTOGRAPHY, CRYPTOGRAPHIC MIGRATION, STANDARDIZATION

### 1. Увод

Навлизането на квантовите компютри бележи историческа граница за съвременната информационна сигурност. Прогнозите са, че в близките години квантови машини ще имат изчислителна мощ, която е способна да разруши основата на класическата криптография – факторизация на големи числа или трудността на изчисление на дискретни логаритми. Криптографските протоколи на почти всички днешни блокчейн системи – включително Bitcoin, Ethereum, Hyperledger и т.н. – се базират точно на тези „твърди“ задачи. Това подлага блокчейн на уязвимости за цялата блокова екосистема на сигурност.

Развитието на постквантовата криптография (PQC), ново поколение криптографски схеми, устойчиви на квантови атаки, е водещ акцент в глобален мащаб. Множество от инициативи, от различни държави, имат за цел стандартизация и ефективно внедряване на устойчиви механизми за защита и да направят блоковата верига, сигурна и непробиваема, както и преди периода на квантовите изчисления. За да се гарантира информационна сигурност, базирана на технологията блокчейн, са необходими следните стъпки:

- Да анализират задълбочено рисковете, които създават квантовите компютри за сигурността на блокчейн системите;
- Да даде систематизиран преглед на всички релевантни постквантови алгоритми;
- Да предложат практически насоки и анализ на внедряването на постквантова защита, разглеждайки редица съществуващи и възникващи блокчейн платформи;
- Да формулира препоръки за бъдеще устойчиво развитие на блокчейн екосистемата в постквантова ера.

### 2. Специфика на блокчейн системите и тяхната криптографска основа

Блокчейн технологиите се основават на принципите на децентрализираната верификация и непроменяемост на данните. Всяка трансакция се валидира чрез сложни криптографски механизми: хеширане (SHA-256, Кесак/SHA-3), цифрови подписи (ECDSA, RSA), произвеждане на случайни стойности (Nonce), както и доказателства за работа (Proof of Work) или дял (Proof of Stake).

Класическите блокчейн (Bitcoin, Ethereum, Hyperledger и др.) използват алгоритми, чиято сигурност е неподвластна на атаките на сегашните класически машини. Фундаментална обаче остава предпоставката, че изчисляването на частния ключ по даден публичен е невъзможно в практично време. Появата на квантовите компютри с достатъчна изчислителна

мощ обаче заплашва да преобърне този постулат: алгоритъмът на Шор ще позволи, например, бързо изчисление на ECDSA частни ключове по публичната информация.

### 3. Необходимостта от постквантова сигурност

Осъзнавайки размера на заплахата и сигурността, на която трябва да отговорят, изследователската и индустриалната общност вече разработва нов клас криптографски механизми, устойчиви на квантови атаки – т.нар. постквантова криптография (PQC). Списъкът на подлежащите на рисковете системи нараства: компрометиране на исторически блокчейн адреси, възможност за атаки срещу консенсусни алгоритми, подмяна на трансакции и дори създаване на „замърсени“ блокове.

Един от критичните моменти е, че дори да не съществува публично известен достатъчно мощен квантов компютър днес, данните могат да бъдат прихващани, събирани и декриптирани в бъдеще. Институции и организации по света вече се подготвят за т.нар. „криптографска миграция“ – преход към постквантови алгоритми, които ще гарантиран безвъзвратно и сигурно криптиране на данните.

В настоящата разработка ще направя изчерпателен анализ на:

- Принципи и уязвимости на съвременните блокчейн системи пред квантовите заплахи;
- Основните видове постквантови криптографски алгоритми. Предимства, недостатъци и приложимост в децентрализирана среда<sup>1</sup>;
- Актуалното състояние на световната научна и практическа насоченост по отношение на сигурността на блокчейн в постквантовата ера;
- Практически насоки за реализиране на постквантова защита на блокчейн системите, регулиране, стандарти и бъдещи направления за развитие.

### 4. Съвременни криптографски механизми в блокчейн

*Криптографски основи на класическите блокчейн системи*

Блокчейн системите са изградени на базата на набор от утвърдени криптографски механизми, които гарантират целостта, достоверността и непроменяемостта на информацията, записана във веригата от блокове. Основните видове криптографски методи са:

<sup>1</sup> 国家标准 (GB), 2024. 量子密钥分发密码协议 (Криптографски протокол за квантово разпределение на ключове). Държавен стандарт на КНР

**Криптографски хеш-функции.** При тази функция хеширането е в основата на създаването на блоковете, връзките между тях и валидирането на трансакции. Най-широко използваните функции са:

- SHA-256 – стандарт в Bitcoin и др.;
- Кескак/SHA-3 – използван в Ethereum. Тези функции трябва да бъдат устойчиви на колизии (две различни стойности да не дават един и същи изход) и да не може да се възстанови оригиналното съобщение от хеша).

**Симетрична криптография.** При този вид криптография се използва сигурност на комуникациите между възли. Алгоритми като AES предоставят ефективна защита на трафика, но се прилагат на по-ниско ниво в системите.

**Асиметрична криптография (публично-частни ключове).** Тя е в основата на:

- Идентификация и удостоверяване (подписи на трансакции);
- Управление на достъпа чрез т.нар. публични адреси.

Още от появата на Bitcoin се използват ECDSA<sup>2</sup> – цифрови подписи на база елиптични криви и RSA – приложим в част от частните платформи. Подписните схеми позволяват само притежателят на частния ключ да извърши трансакция, като гарантират нейната защита и неприкосновеност.

**Елементи на блокчейн, защитени чрез криптография**

- **Хеширане на блока и дървото на Меркъл**

Създаването на уникален идентификатор на всеки блок зависи от хеша на предходния блок. По този начин един блок (т.е. една информационна единица) има хеш в началото и в края си.

Дърветата на Меркъл обединяват хешовете на всички трансакции в блока, като позволяват бърза и сигурна проверка на съдържанието.

- **Цифрови подписи и управление на права:**

Всяка трансакция се подписва чрез частния ключ на клиента и валидирането става посредством публичния ключ.

Важно е да отбележа, че само притежателят на частния ключ дава нареждане за дейности по веригата<sup>3</sup>.

- **Протоколи за консенсус:**

Протоколите за консенсус, Proof-of-Work и Proof-of-Stake, разчитат на функциите на хеша за доказателство на изчислителна работа или дял.

Ако не е надеждна криптографията, ще е невъзможно да се осигури устойчивост и защита към атаки.

**Слабости на системата спрямо квантови атаки**

**Алгоритъмът на Шор**

Квантовите компютри, използвайки алгоритъма на Питър Шор, могат за много кратко време да разбият криптография, основаваща се на факторизация и на задачата за дискретен логаритъм. Това включва ECC (елиптични криви) и RSA.

256-битов ECDSA ключ<sup>4</sup>, може да бъде атакуван за броени часове или дни при достатъчно ефективен квантов компютър.

Важно е да обърне внимание, че при този алгоритъм е за всички публични адреси, чиито публични ключове вече са известни или „изплуват“ по време на трансакция, ще бъдат уязвими и ще бъдат „прибити“ при квантови атаки.

**Алгоритъмът на Гроувър<sup>5</sup>**

Този алгоритъм е известен като квантово търсене в квантовите изчисления. Представява неструктурирано търсене, което означава, че намира с голяма вероятност уникалния вход за функцията „черна кутия“.

В практиката това означава, че за 256-битов SHA-256 квантовата сложност става 2 по 128, което все още е недостижимо, но по-малка сигурност (напр. 128-битов хеш) е вече рискова среда и не се препоръчва, защото не може да гарантира цялост и неманипулираност на данните.

Този алгоритъм налага да се преосмисли и програмира нова дължината на ключовете и хешовете за бъдещите системи.

**Видове атаки и бъдещи сценарии**

- **HarvestNow, DecryptLater (HNDL):**

- Чрез злонамерени дейности могат още днес да събират криптирана блокчейн информация (трансакции, адреси, ключове), която след време, при достигане на зрелост на квантовите компютри, да декриптират ретроспективно.
- Исторически адреси, които са задействани преди квантовия преход, могат да бъдат цел на ретроактивни атаки.

- **Replay и Man-in-the-Middle атаки.** Експонираната публична ключова информация може да улесни фалшификация на трансакции или неоторизиран достъп до средства.

## 5. Преход към постквантова епоха

Класическите криптографски механизми в основата на блокчейн осигуряват в момента високо равнище на сигурност, но същевременно са фундаментално уязвими пред бъдещето на квантовите изчисления. Предизвикателството се изразява не само във внедряването на нови алгоритми, но и в осигуряването на съвместимост, производителност и миграция на съществуващия софтуер и инфраструктура. В контекста на предстоящия „квантов преход“ е жизненоважно да бъдат идентифицирани какви точно механизми и подходи ще се окажат адекватни за постквантова защита.

**Стандарти и регулации в постквантова блокчейн сигурност**

В настоящия подраздел ще представя и анализирам съществуващото и предстоящото национално и международно регулиране и стандарти по постквантова защита на блокчейн. Включени са международни инициативи, както и ключови стратегически програми в Китай, Русия, Европейския съюз и САЩ.

**Международни инициативи и стандарти**

<sup>2</sup> Elliptic Curve Digital Signature Algorithm (англ. език). Стандарт за цифрови подписи, който използва асиметрична криптография за удостоверяване на трансакции

<sup>3</sup> Пример разходване на средства, при биткойн адреси и криптовалута. (бел.авт.)

<sup>4</sup> Най-често се използва при Bitcoin. (бел.авт.)

<sup>5</sup> Лов Кумар Гроувър е индийско-американски компютърен учен. Той е съзателят на алгоритъма за търсене в базата данни на Гроувър, използван в квантовите изчисления. (бел.авт.)

## NIST PQC (National Institute of Standards and Technology)<sup>6</sup>, Съединените американски щати

Създава се през 2016 г. и е основен двигател на развитието и стандартизацията на постквантова криптография. Инициативата се провежда в няколко кръга с участие на мабашни проекти – избрани са финалисти за дигитални подписи и криптиране: Kyber, Dilithium, Falcon, SPHINCS+.

Инициативата предвижда публичната спецификация на стандартите за 2024-2025 г. NIST предоставя предварителни ръководства за внедряване и тестови имплементации<sup>7</sup>.

Важно е да отбележа, че едни от най-големите международни организации приемат NIST PQC за основа при изграждането на “cryptographic agility” (гъвкавост за бързо преминаване между крипто схеми).

### Внедряване в блокчейн платформи

Голяма част от консорциумите с отворен код и корпоративни блокови вериги (Hyperledger, Algorand, Ethereum) тестват или интегрират NIST участниците и избират финалисти в последователните кръгове<sup>8</sup>. В резултат са създадени и утвърдени “hybrid cryptography” стандарти за преход с паралелни класически и PQC алгоритми<sup>9</sup>. Политическа воля в различните държави трябва да наложи изисквания към държавните структури, както и към индустрията (е-правителство, финансови услуги) да стартират оценка на криптографската ловкост и бързина още преди 2025 г.

## ETSI (European Telecommunications Standards Institute), Европейски съюз

Създава се работната група Quantum Safe Cryptography (QSC)<sup>10</sup>, която на базата на анализи и доклади дефинира общоевропейски стандарти и препоръки, особено за пренос на данни, IoT и критична инфраструктура. Работната група създава – Технически доклад за стратегии и препоръки за безопасен преход от съществуващите криптографски системи към такива, които са устойчиви на квантови атаки и злонамерени действия<sup>11</sup> и Доклад за пост-квантова

криптография и алгоритмична рамка<sup>12</sup>. Това са основните документи, които ръководят внедряването на PQC и напътстват процедурите за миграция. Ключово място в тях заема „quantum-safe blockchain” (пост-квантова криптография на технологията блокчейн) принципите и изготвянето на тестови рамки за децентрализирани регистри и платформи.

## ISO (International Organization for Standardization)

Стандартът ISO/IEC 29791 “Cryptography – Security framework for post-quantum cryptography migration”<sup>13</sup> (ISO/IEC, 2022), е развиваш се, фокусиран върху предоставянето на рамка за сигурност за мигриране към пост-квантова криптография. Основната му цел е да помогне на организациите да преминат от настоящите криптографски алгоритми, които са уязвими за квантовите компютри, към PQC алгоритми, които са устойчиви на подобни атаки.

## 6. Заключение

Преходът е от решаващо значение за поддържане на сигурността на цифровите системи в условията на бъдещи подобрения в квантовите изчисления и защита от все по-чести кибератаки.

Необходимо е да се създадат стандарти, които ще осигурят съвместимост и синхронизация на PQC алгоритми в световен аспект, както и пътна карта за миграция на глобалните банкови и финансови системи.

Изработването на стандарти обхваща различни дейности с представители на водещите блокчейн консорциуми, комерсиални и академични институции, с цел запознаване на заинтересованите лица и запознаване на новостите в технологично направление.

## Литература

1. ISO/IEC. 2022. *ISO/IEC 27001:2022 Information security, cybersecurity and privacy protection — Information security management systems — Requirements* [онлайн]. Трето издание. Geneva: International Organization for Standardization. [посетен 05.03.2026]. Достъпно на: [www.iso.org](http://www.iso.org)
2. NIST. 2020. *Zero Trust Architecture: NIST Special Publication 800-207* [онлайн]. Scott Rose, Oliver Borchert, Stu Mitchell и др. Gaithersburg, MD: National Institute of Standards and Technology. [посетен 05.03.2026]. Достъпно на <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/SpecialPublications/NIST.SP.800-207.pdf>
3. ZHAO, Guohong и др. 2020. *A Coordinated Guidance Mechanism of Missile Swarm Based on Blockchain. Tactical Missile Technology* [онлайн]. 2020, № 202 (04), с. 100–111 [посетен 01.03.2026]. ISSN 1009-1300. doi:10.16358/j.issn.1009-1300.2020.1.528
4. ЕВРОПЕЙСКИ ПАРЛАМЕНТ И СЪБЕТ. 2022. *Директива (ЕС) 2022/2555 относно мерки за високо общо ниво на киберсигурност в Съюза (NIS 2)* [онлайн]. Официален вестник на ЕС, L 333, 27.12.2022 г. [посетен 05.03.2026]. Достъпно

<sup>6</sup> NIST. 2020. *Zero Trust Architecture: NIST Special Publication 800-207* [онлайн]. Scott Rose, Oliver Borchert, Stu Mitchell и др. Gaithersburg, MD: National Institute of Standards and Technology. [посетен 05.03.2026]. Достъпно на <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/SpecialPublications/NIST.SP.800-207.pdf>

<sup>7</sup> ЕВРОПЕЙСКИ ПАРЛАМЕНТ И СЪБЕТ. 2022. *Директива (ЕС) 2022/2555 относно мерки за високо общо ниво на киберсигурност в Съюза (NIS 2)* [онлайн]. Официален вестник на ЕС, L 333, 27.12.2022 г. [посетен 05.03.2026]. Достъпно на: [eur-lex.europa.eu](http://eur-lex.europa.eu)

<sup>8</sup> ZHAO, Guohong и др. 2020. *A Coordinated Guidance Mechanism of Missile Swarm Based on Blockchain. Tactical Missile Technology* [онлайн]. 2020, № 202 (04), с. 100–111 [посетен 01.03.2026]. ISSN 1009-1300. doi:10.16358/j.issn.1009-1300.2020.1.528

<sup>9</sup> 战术导弹技术 (TACTICAL MISSILE TECHNOLOGY), 2024. *Академично списание на Китайската корпорация за аерокосмическа наука и индустрия*

<sup>10</sup> IBM. 2026a. *What is Data Governance?* [онлайн]. IBM Think Topics. [посетен 04.03.2026]. Достъпно на: <https://www.ibm.com/think/topics/data-governance>

<sup>11</sup> ETSI. 2019. *ETSI TR 103 619 V1.1.1: Quantum-Safe Computing; User working group* [онлайн]. Sophia Antipolis: European Telecommunications Standards Institute. [посетен 05.03.2026]. Достъпно на: [www.etsi.org](http://www.etsi.org)

<sup>12</sup> ETSI. 2020. *ETSI GR QSC 001 V1.1.1: Quantum-Safe Cryptography; Trustworthy Quantum-Safe Cryptographic Implementation* [онлайн]. Sophia Antipolis: European Telecommunications Standards Institute. [посетен 05.03.2026]. Достъпно на: [www.etsi.org](http://www.etsi.org)

<sup>13</sup> ISO/IEC. 2022. *ISO/IEC 27001:2022 Information security, cybersecurity and privacy protection — Information security management systems — Requirements* [онлайн]. Трето издание. Geneva: International Organization for Standardization. [посетен 05.03.2026]. Достъпно на: [www.iso.org](http://www.iso.org)

---

на: eur-lex.europa.eu

5. 国家标准 (GB), 2024. 量子密钥分发密码协议  
(Криптографски протокол за квантово  
разпределение на ключове). Държавен стандарт на  
КНР
6. 战术导弹技术 (TACTICAL MISSILE TECHNOLOGY),  
2024. Академично списание на Китайската  
корпорация за аерокосмическа наука и индустрия



# GEOTECHNOLOGIES IN INTELLIGENCE MANAGEMENT

## ГЕОТЕХНОЛОГИИТЕ В УПРАВЛЕНИЕТО НА РАЗУЗНАВАНЕТО

Д-р Личева, Т.

НТС, секция Техническа сигурност

teodora.licheffa@abv.bg

**Abstract:** The report examines the critical role of geotechnologies in the modern security environment. They are analyzed through the prism of the intelligence management cycle, which is carried out at strategic, operational and tactical levels. Geotechnologies are integrated into each stage of this cycle: from the initial collection and analysis of data, through predictive threat modeling and visual support for decision-making, to detailed logistical and operational planning. Their application continues in the implementation phase through real-time coordination, as well as in the control and evaluation phase, where they provide objective data on the effectiveness of the operations carried out.

**Keywords:** SECURITY, GEOTECHNOLOGIES, INTELLIGENCE, MANAGEMENT CYCLE, GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEMS, FORECASTING

### 1. Увод

Съвременната среда на сигурност се характеризира с висока комплексност, динамичност и многомерност. Геополитическото съперничество, асиметричните заплахи, хибридните операции и ускорената технологична трансформация формират контекст, в който управлението на сигурността се превръща в изключително сложен, но критичен процес. В този контекст геотехнологиите – географски информационни системи, сателитно и аероразузнаване, глобални навигационни сателитни системи, безпилотни летателни апарати и свързаните с тях аналитични платформи се утвърждават като ключов и основен ресурс за разузнаването и контраразузнаването, както на глобалните лидери, така и на държави със сравнително ограничени ресурси като България.

В доклада ще анализирам мястото и ролята на геотехнологиите във всеки елемент от управленския цикъл на сигурността – от събирането и анализа на информацията до контрола на изпълнението на взетите управленски решения.

Управленския цикъл в разузнаването функционира на три управленски нива – стратегическо, тактическо и оперативно – като всяко от тях има различен времеви хоризонт и степен на специфичност и задълбоченост.

На стратегическо ниво доминират дългосрочни прогнози и структуроопределящи решения; на тактическо – средносрочното разпределение на ресурси и конфигуриране на способности; на оперативно – непосредственото планиране и провеждане на конкретни операции.

В разузнаването този управленски цикъл се „наслажда“ върху класическия разузнавателен цикъл (формулиране на потребности от информация, събиране, обработка и анализ, разпространение и обратна връзка) и го допълва. Геотехнологиите влизат в този цикъл първоначално като технологичен инструмент за събиране на информация (аерофотография, сателитни изображения, GPS проследяване), но в съвременните условия те са интегрирани във всеки етап – от формулиране на потребностите и моделиране на сценарии, през визуализацията и поддръжката на вземането на решения, до контрола и оценката на изпълнението<sup>1</sup>.

На стратегическо ниво геотехнологиите поддържат разузнавателния и управленския цикъл чрез постоянен мониторинг на противника, наблюдение на кризисни региони, оценка на инфраструктура и ресурсни потоци. На тактическо ниво те подпомагат планирането и изпълнението на конкретни операции чрез подробни карти, 3D модели и реално времеви данни от БЛА и сензори. На оперативно ниво геотехнологиите осигуряват навигация, целеуказване и координация на участващите сили<sup>2</sup>.

### 2. Събиране, обработка и анализ на достъпната информация за възможностите на геотехнологиите

Първият етап от управленския цикъл – събиране, обработка и анализ на информацията – има двойно значение, когато става дума за геотехнологии в разузнаването. От една страна, разузнаването събира, обработва и анализира геопространствена информация за средата (това е терен, инфраструктура, разположение на сили, динамика на заплахите). Но от друга – събира и оценява информация за самите геотехнологии, които могат да бъдат използвани като средство за постигане на предимство или като потенциална заплаха.

В контекста на управленския цикъл на разузнаването този първи етап включва:

- **определяне на информационните потребности** на политическото и военното ръководство. Важно е да се определят точно какви геопространствени данни са необходими за оценка на дадена криза, операция или дългосрочна тенденция;
- **събиране на данни** от различни геотехнологични източници – военни и търговски сателитни системи, тактически и стратегически БЛА, наземни сензори, GPS логове, ГИС-базирани регистри;
- **първична обработка** – калибриране, орторектификация, филтриране на „шум“, агрегиране на данни;
- **аналитична обработка** – пространствен анализ, времеви анализ, откриване на модели и аномалии, комбиниране с други видове разузнаване (HUMINT, SIGINT);
- **оценка на възможностите и ограниченията** на използваните геотехнологии – точност, резолюция, честота на наблюдение, уязвимости (например към смущения на сателита или затруднения).

Качеството при извършване на този първи етап в управленски план определя основата за всички последващи действия. Непълнота или неточности в геопространствената картина водят до деформиран, неточен или непълен разузнавателен продукт и могат да предизвикат погрешни управленски решения. Това е причината съвременните разузнавателни служби да инвестират значителни ресурси в разработване на устойчиви процеси за събиране, обработка и анализ на геоданни и в развитие на квалифициран експертен

<sup>1</sup> <https://www.esri.com/en-us/industries/intelligence/overview-of-gis>

<sup>2</sup> <https://gistbok-topics.ucgis.org/DA-025>

ресурс – анализатори, ГИС специалисти, инженери по дистанционни изследвания<sup>3</sup>.

### 3. Прогнозиране и изготвяне на управленски решения

Във втория етап на управленския цикъл се изготвят прогнози, прогнозни оценки и варианти за решения. Той заема централно място в разузнаването. Геотехнологиите вече не са само инструмент за наблюдение, но са активен компонент в прогностичното моделиране на средата на сигурност.

Прогнозирането в разузнавателен контекст включва:

- оценка на вероятни сценарии за развитие на ситуацията в пространството и времето;
- определяне на вероятни маршрути, зони на концентрация на сили, възможни места за укритие, както и логистична поддръжка;
- анализ на уязвимости на инфраструктурата и населението;
- оценка на потенциалното въздействие на различни управленски или оперативни действия.

Геотехнологиите се включват в процеса чрез<sup>4</sup>:

- **ГИС-базирано моделиране и симулации** – модели на разпространение, маршрути, логистични вериги. ГИС системите в комбинация с алгоритми за прогнозен анализ и изкуствен интелект се използват за геопропространствен анализ на поведението;
- **Моделиране на достъпност и проникваемост** – чрез анализ на релеф, инфраструктура, климатични условия и налични пътища на придвижване се моделират вероятните действия на противника, възможните маршрути на инвазия или евакуация, както и най-вероятните места за концентрация на сили;
- **Сценарийно планиране на базата на геоданни** – в управленския цикъл сценариите за развитие на конфликти или кризи са неразривно свързани с геопропространствени параметри. Пример за това е използването на сателитни изображения и ГИС за оценка на възможните направления на настъпление и логистични коридори по време на класически военни конфликти, както и за оценка на урбанистичната среда при антитерористични операции;
- **Пространствен анализ на заплахи** – чрез интеграция на разузнавателни данни за предходни инциденти, инфраструктура и социално-икономически фактори се има възможност да се създават карти на риска, които служат за стратегическо прогнозиране и приоритизиране на разузнавателните усилия.

Геотехнологиите позволяват на разузнавателните общности да преминават от реактивен към проактивен модел – вместо да регистрират последиците, те се стремят да предвиждат движението и действията на противника.

От гледна точка на управленското ниво, резултатите от този етап се материализират в варианти за управленски решения –

варианти за разполагане на сили, за приоритетно наблюдение на определени региони, за подкрепа на съюзнически операции.

Геотехнологичните материали – тематични карти, модели, сценарийни визуализации – са неразделна част от докладите към политическото ръководство и очертават пространственото изражение на управленските избори.

### 4. Вземане на управленско решение в разузнаването

Третият етап вземането на управленско решение е моментът, в който събраната и анализирана информация, включително геопропространствената, се превръща в конкретен избор на действие или бездействие. Геотехнологиите в разузнаването влияят върху този процес по няколко ключови начина.

1. Осигуряват визуална и интуитивна основа за вземане на решения. Докато традиционните текстови доклади могат да бъдат прегледни, но абстрактни, геопропространствените материали, като карти, теренни модели, слоеве с данни за инфраструктура и население позволяват на вземащите решения да възприемат комплексна информация в пространствен контекст;
2. Допринасят за намаляване на неопределеността в процеса на вземане на решения. В съвременните условия достъпът до високорезолуционни сателитни изображения и БЛА наблюдение в реално време, дава на политическите и военните ръководства реалистична картина на заплахите;
3. Подпомагат оценката на алтернативните варианти. Чрез ГИС могат да се оценяват различни варианти по отношение на пространствените им последици – например как различни конфигурации на гранични патрули влияят върху покритието на рискови зони, или как различни маршрути за придвижване на екипи влияят върху времето за реакция и експозицията към рискове;
4. Поставят нови изисквания към отговорността при вземане на решения. Наличието на високодетаилна геопропространствена информация, включително записи от БЛА, издига стандарта за доказуемост, прозрачност и отчетност на вземащите решения, особено когато става дума за операции с потенциални цивилни жертви.

### 5. Планиране на изпълнението на управленското решение

След като управленското решение е взето, следващият етап на цикъла е планирането. В разузнавателен контекст това означава детайлно пространствено и времево разгръщане на приетото решение: определяне на маршрути, времеви графици, логистични вериги, комуникационни възли и резервни планове. Геотехнологиите са в основата този процес, чрез<sup>5</sup>:

- позволяване на оперативно и тактическо картографиране на зоната на действие. С помощта на многослоевни карти, включващи релеф, инфраструктура, население, обекти с критично значение, разузнавателните и оперативни структури могат да изработят реалистични и детайлизирани планове;

<sup>3</sup> <https://www.marines.mil/Portals/1/MCWP%202-26.pdf>

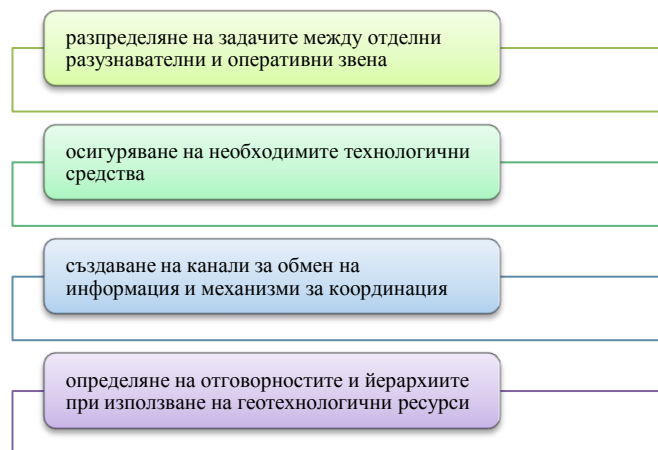
<sup>4</sup> <https://gistbok-topics.ucgis.org/DA-025>

<sup>5</sup> <https://www.esri.com/en-us/industries/intelligence/overview>

- възможност за изграждане на оперативни сценарии и симулации. На базата на разузнавателните данни и приетите управленски решения могат да се моделират различни варианти за развитие на операцията;
- подпомагане на логистичното планиране. С анализ на инфраструктурата (пътища, мостове, летища, пристанища) и оценка на тяхното състояние се планират маршрути за придвижване, снабдяване и евакуация. При военни и специални операции това включва определяне на точки за кацане и излитане на хеликоптери и БЛА, безопасни коридори за проникване и изтегляне, както и резервни маршрути при загуба на основния;
- спомагане на интеграция на мултинационални усилия. В рамките на НАТО и ЕС често се планират операции, в които участват сили от различни държави. Използването на стандартизирани ГИС и обмен на геопросторствени материали позволява общо планиране и съгласуване на действията в пространството;
- осигуряване на подробни триизмерни модели на градската инфраструктура, които са критични за планирането на антитерористични операции, операции по освобождаване на заложници и защита на критична инфраструктура.

## 6. Организиране на изпълнението

Фазата на организиране включва създаване и координация на структури, процеси и ресурси, необходими за реализацията на приетото решение. В разузнавателния контекст това означава:



**Фиг. 1.** Дейности по организиране на изпълнението на управленското решение в разузнаването

Организационният процес включва:

- **създаване ГИС клетки** в разузнавателните и щабните структури, които да поддържат постоянно геопросторствено осигуряване на операциите и действащите екипи;
- **интеграция на геотехнологиите с други видове разузнаване** – чрез общи платформи, които да позволяват обединяване на HUMINT, SIGINT, OSINT и GEOINT;

- **разработване на стандарти и протоколи** за използване, защита и обмен на геопросторствени данни, включително класификационни нива и процедури за де-класифициране, задължително определяне ниво на достъп;
- **обучение и подготовка на персонала** – създаване на програми за обучение на ГИС специалисти, анализатори по дистанционни изследвания, оператори на БЛА и др. технологични експерти.

## 7. Изпълнение на взетото управленско решение

Етапът на реализация е моментът, в който планираното управленско решение се превръща в конкретни действия на терен.

От гледна точка на управлението реализацията, базирана на геотехнологии, има няколко особености:

- висока зависимост от технологична инфраструктура – сателитни системи, комуникационни канали, сървърни центрове, които трябва да бъдат надеждни и защитени срещу кибератаки;
- необходимост от гъвкавост – оперативните решения могат да могат да се адаптират в реално време на базата на новопостъпващи геоданни в реално време;
- високи изисквания за координация – всички участници в процесите – разузнаване, военни части, полицейски структури, международни партньори трябва да споделят единна геопросторствена картина и да действат синхронно.

## 8. Контрол и оценка на изпълнението спрямо планираните цели

Последният етап на управленския цикъл е контрол/проверка на изпълнението с планираната цел. С него се дава оценка на ефективността на проведените операции, така и за натрупване на организационен опит. Геотехнологиите имат важна роля в този процес по следните направления:

- осигуряват обективни данни за резултатите от операциите. Чрез сравнителен анализ на сателитни изображения „преди“ и „след“ операция могат да се оценят нанесените щети, промени в инфраструктурата, движение на населението и др. Този метод се използва за оценка на ефективността на изпълнението, но и за мониторинг на спазване на международни договори и споразумения;
- подпомагат вътрешния контрол и отчетност. Чрез записаните данни от GPS устройства и логове от БЛА може да се реконструира хронологията на действията на собствените сили, да се установят отклонения от плана и да се оценят индивидуалните и колективните решения. Това има значение както за тактическия анализ, така и за юридическата и политическата отговорност;
- спомагат за обратна връзка към управленските и разузнавателни цикли. Резултатите от операциите, картографираните и анализирани в ГИС, служат като база за актуализиране на разузнавателните модели, на оценките на

заплахите и на бъдещите планове. По този начин управленският цикъл се затваря и отново започва с по-високо ниво на знание и опит.

Както е видно от гореизложения текст геотехнологиите проникват във всеки етап на управленския цикъл в разузнаването. Те спомагат за:



**Фиг. 2.** Използване на геотехнологиите в управленския цикъл на разузнаването

## 9. Заключение

Геотехнологиите участват в целия управленски цикъл на разузнаването – от първото събиране на информация до крайния контрол и оценка. В началния етап те осигуряват масиви от геопространствени данни (сателити, БЛА, GNSS, ГИС) и инструменти за тяхната обработка и анализ, което формира базата за надеждни разузнавателни оценки. В етапа на прогнозиране геотехнологиите позволяват ГИС-моделиране, сценарии и карти на риска, върху които се изграждат варианти за управленски решения.

При вземането на решения ГИС и GEOINT материалите дават визуална и интуитивна картина на обстановката и правят възможно сравняване на алтернативни варианти в пространствен аспект. На етапите планиране и организиране те служат за детайлно оперативно и тактическо картографиране, планиране на маршрути, разполагане на сили и създаване на специализирани ГИС/GEOINT звена и стандарти. В реализацията геотехнологиите поддържат навигация, наблюдение и координация в реално време, а при контрола – осигуряват обективни данни („преди/след“), GPS тракове и ГИС анализ за оценка на резултатите и за връщане на натрупания опит обратно в началото на цикъла.

## Литература

1. <https://www.esri.com/en-us/industries/intelligence/overview-of-gis>
2. <https://gistbok-topics.ucgis.org/DA-025>
3. <https://www.marines.mil/Portals/1/MCWP%202-26.pdf>
4. <https://gistbok-topics.ucgis.org/DA-025>
5. <https://www.esri.com/en-us/industries/intelligence/overview>