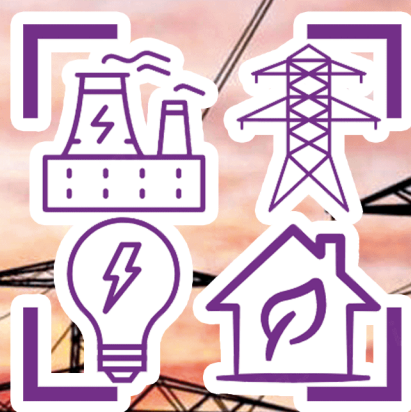




ISSN 2224-0349

ВІСНИК
Національного технічного університету
«ХПІ». Серія:

Енергетика: надійність та енергоефективність



1 (10)
2025

Харків

ISSN 2224-0349

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ
І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

MINISTRY OF EDUCATION
AND SCIENCE OF UKRAINE

National Technical University
"Kharkiv Polytechnic Institute"

**Вісник Національного
технічного університету
«ХПІ». Серія: Енергетика:
надійність та
енергоефективність**

№ 1 (10) 2025

Збірник наукових праць

Видання засноване у 1961 р.

**Bulletin of the National
Technical University
"KhPI". Series: Energy:
Reliability and Energy
Efficiency**

No. 1 (10) 2025

Collection of Scientific papers

The edition was founded in 1961

Харків
НТУ «ХПІ», 2025

Kharkiv
NTU "KhPI", 2025

Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність = Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Energy: Reliability and Energy Efficiency: зб. наук. пр. / Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». — Харків : НТУ «ХПІ», 2025. — № 1 (10) 2025.— 136 с. — ISSN2224-0349.

Видання присвячене питанням теоретичних та практичних результатів досліджень і розробок, пов'язаних з проблемами надійності та ефективності роботи енергетичного устаткування, а також електроенергетичної системи в цілому. Розглядаються проблеми електроспоживання, енергозбереження і підвищення якості електричної енергії.

Для науковців, викладачів вищої школи, аспірантів, студентів і фахівців в галузі енергетики, надійності та ефективності роботи енергетичного устаткування.

The publication is devoted to the issues of theoretical and practical results of research and development associated with problems of reliability and efficiency of power equipment and power system as a whole. The problems of electricity consumption, energy saving and improvement of the quality of electric energy are considered.

For scientists, teachers of higher education, post-graduate students, students and specialists in the field of energy, reliability and efficiency of power equipment.

Ідентифікатор медіа R30-02561, згідно з рішенням Національної ради України з питань телебачення і радіомовлення від 11 січня 2024 року №33.

Мова статей – українська, англійська.

Наказом МОН України № 1017 від 27 вересня 2021 року «Про рішення з питань присудження наукових ступенів і присвоєння вчених звань та внесення змін до наказу Міністерства освіти і науки України від 29 червня 2021 року № 735» Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність включено до категорії Б «Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора наук, кандидата наук та ступеня доктора філософії».

Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність включений до зовнішніх інформаційних систем, у тому числі в бібліографічну базу даних OCLC WorldCat (США), індексується пошуковими системами Google Scholar і CrossRef; зареєстрований у світовому каталозі періодичних видань бази даних Ulrich's Periodicals Directory (New Jersey, USA).

Офіційний сайт видання: <http://erec.khpi.edu.ua/>

Засновник

Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

Founder

National Technical University
"Kharkiv Polytechnic Institute"

Редакційна колегія

Головний редактор:

Шевченко С. Ю., д.т.н., проф., НТУ «ХПІ», Україна

Члени редколегії:

Безпрозваних Г. В., д.т.н., проф., НТУ «ХПІ», Україна

Говоров П. П., д.т.н., проф., ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, Україна

Колкун М., д.т.н., проф., Технічний університет у Кошицях, Словаччина

Морва Д., д.т.н., проф., Університет Обуда, Угорщина

Данильченко Д. О., к.т.н., доц., НТУ «ХПІ», Україна

Довгалюк О. М., к.т.н., доц., НТУ «ХПІ», Україна

Лазуренко О. П., к.т.н., доц., НТУ «ХПІ», Україна

Шайда В. П., к.т.н., доц., НТУ «ХПІ», Україна

Шутенко О. В., к.т.н., доц., НТУ «ХПІ», Україна

Відповідальний секретар:

Кулик О. С., НТУ «ХПІ», Україна

Editorial staff

Editor-in-chief

Shevchenko S. Yu., D.Tech.Sc., Prof., NTU "KhPI", Ukraine

Editorial staff members:

Bezprozvannykh G. V., D.Tech.Sc., Prof., NTU "KhPI", Ukraine

Hovorov P. P., D.Tech.Sc., Prof., O.M. Beketov NUUE, Ukraine

Kolcun M., D.Tech.Sc., Prof., Technical University of Košice, Slovakia

Morva G., D.Tech.Sc., Prof., Óbuda University, Hungary

Danylchenko D. O., Cand.Tech.Sc., Docent, NTU "KhPI", Ukraine

Dovgalyuk O. M., Cand.Tech.Sc., Docent, NTU "KhPI", Ukraine

Lazurenko O. P., Cand.Tech.Sc., Docent, NTU "KhPI", Ukraine

Shaïda V. P., Cand.Tech.Sc., Docent, NTU "KhPI", Ukraine

Shutenko O. V., Cand.Tech.Sc., Docent, NTU "KhPI", Ukraine

Executive secretary:

Kulyk O. S., NTU "KhPI", Ukraine

Рекомендовано до друку Вченою радою НТУ «ХПІ».

Протокол № 7 від 27 червня 2025 р.

© Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», 2025

DMYTRO DANYLCHENKO – Candidate of Technical Sciences (PhD), Docent, Senior Researcher, Professor of the Department of Electric Power Transmission, National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7912-1849>; e-mail: dmytro.danylchenko@kpi.edu.ua.

YANG GUICHUAN ✉ – Master Student at the Department of Electric Power Transmission, National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-7758-9900>; e-mail: yang.guichuan@ieee.kpi.edu.ua.

RESEARCH ON SYSTEM OPTIMIZATION AND STRATEGIC PATH OF CHINA'S ENERGY SECURITY FROM THE PERSPECTIVE OF ELECTRICAL ENGINEERING

The article presents a comprehensive study of China's energy security from a technical and economic perspective, taking into account current challenges and strategic goals of the energy transition. The main focus is on the quantitative analysis of structural problems that threaten the stability of the energy system. In particular, based on 2023 data, it was found that the structure of energy consumption remains dependent on fossil fuels: the share of coal is 56.4 %, and oil import dependence is 72.6 %. In addition, the probability of overloading the power grid in extreme weather conditions was found to be 7.3 %, indicating the system's vulnerability to climate change. The study modeled the effectiveness of the implementation of Smart Grid technologies, which increased the efficiency of ultra-high voltage power transmission by 18 %. The study also recorded a 40 % increase in the total capacity of virtual power plants and an increase in the internal rate of return of energy storage systems based on lithium batteries to 8.7 %. From the perspective of long-term strategic planning, the proposed multi-energy flow model estimates the cost of transporting 500 km of green hydrogen at 35 yuan/kg, and also forms a standardized power compensation mechanism (0.08 yuan/kW). The empirical results confirm the feasibility of such measures: the rate of rejection of new transmission lines in the northwestern regions has been reduced to 3.2 %, and the introduction of 12 GW of energy storage systems in the Yangtze Delta has reduced peak load by 15%. It is also demonstrated that the cost of hydrogen production from offshore wind energy has reached 0.3 yuan/kWh, or 35 yuan/kg, taking into account market electricity tariffs. The article proposes strategic measures to ensure energy security, including investments in scientific and technological development in the amount of 0.8 % of gross domestic product, modernization of the power grid with funding of 4.2 trillion yuan over the next 10 years, and the creation of an adaptive political monitoring system. These results form the basis for a systematic electrical engineering approach to ensuring China's energy sustainability in the context of global transformations.

Keywords: energy security; electrical engineering; Smart Grid; multi energy complementarity; digital twin.

Introduction. China's energy security is facing challenges, with risks associated with its reliance on fossil fuels for consumption, uneven supply, increased dependence on certain energy sources, and issues with renewable energy and grid intelligence in the power system. The coping strategies include adjusting the structure, building a smart grid, and ensuring transportation safety. The existing research has a foundation, but there are still problems to be studied due to changes in energy technology and the international situation [1–10]. This article will explore in depth and provide suggestions.

The purpose of the article. The purpose of the article is to develop an optimization structure of China's energy security from the standpoint of electrical engineering by quantifying current energy threats and structural imbalances, as well as to substantiate technical and economic solutions to improve the efficiency of the electric power system, taking into account the role of innovative technologies, in particular smart grids, virtual power plants, hydrogen energy and energy storage.

1. Background and significance of the topic selection

1.1 Introduction to research background and motivation. As a major energy consuming country, China's energy security is of great significance both domestically and globally. With the increasing demand for energy in economic development, the total energy consumption in 2023 reach 5.72 billion tons of standard coal. The energy structure will be dominated by fossil fuels, with high dependence on oil and natural gas. In

2025, thermal power will account for a large proportion, while renewable energy generation will account for a small proportion. Unreasonable energy structure brings supply risks and also faces challenges such as climate change. To achieve the “dual carbon” goal, it is necessary to adjust the energy structure to ensure energy security. The safety of energy transportation channels is crucial, and ensuring the security of the Malacca Strait is extremely important for China's energy security due to its complex geopolitical situation.

1.2 Clarify the research question and its significance. Currently, China's energy security is facing many challenges, with particularly prominent issues in the power system. The increase in the proportion of renewable energy brings about intermittency and volatility in power generation, and China's peak shaving capacity is insufficient. In 2023, the abandoned wind and solar power rate in the northwest region reach 8.6 %, and it is necessary to rely on energy storage systems and other means to improve consumption capacity. The distribution of energy resources and load centers is uneven, with a cross regional transmission loss of about 3.5 %. It is necessary to optimize the layout of transmission lines and reduce losses. Distributed energy is difficult to connect to the grid due to its power generation characteristics and incomplete grid connection standards. It is necessary to improve standard specifications and strengthen the grid's acceptance capacity. In addition, the insufficient level of intelligence in the power grid restricts the safe and stable operation of the power system, and the equipment failure rate is 1.8 times higher than that of developed countries. It

© D. Danylchenko, Yang Guichuan, 2025



This article is licensed under the terms of the *Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)*. **Conflict of interest:** The authors have declared no conflict of interest.

is necessary to increase investment in the research and application of smart grid technology.

1.3 Briefly explain the research methods and structure. This study uses literature research and data analysis methods to analyze China's energy security issues and provide solutions. By reviewing literature and sorting out theoretical achievements, collecting data on energy consumption structure and quantitatively evaluating the current state of energy security, and predicting trends. Using technical and economic analysis to explore the necessity and feasibility of introducing renewable energy, and comparing its cost with traditional fossil energy generation. Using system dynamics to construct an optimization model for power systems, simulating the operation of power systems under different scenarios, analyzing the impact of measures, and proposing optimization strategies and suggestions.

2. Construction of electrical engineering technical support system

2.1 Optimization configuration model for smart grid. In the optimization configuration of smart grid, cross provincial transmission channel capacity optimization is a key link. Taking the ultra-high voltage transmission channel as an example, a mixed integer programming model with N-1 constraints can be established to effectively solve the optimal transmission capacity. The objective function is:

$$\min \sum_{i=1}^n C_i x_i,$$

C_i is the construction cost of the i -th channel;

x_i is the decision variable, with a value of 0 or 1

The constraints include power balance constraints, line capacity constraints, N-1 safety constraints, etc. In a power grid with 5 ultra-high voltage channels, solving this model can reduce the total construction cost by 15 % and ensure stable operation of the system even in the event of a single channel failure.

The assessment of new energy consumption capacity is also an important aspect of optimizing smart grids. By using PSASP software to simulate and analyze the power system, the peak shaving demand of the system can be calculated under different new energy penetration rates. When the penetration rate of wind and solar power generation reaches 35 % in 2030, the demand for peak shaving in the system will increase by 40 %. By optimizing the regulation capability of traditional power sources such as thermal power and hydropower, as well as configuring energy storage equipment, the system's ability to absorb new energy can be effectively improved, reducing the phenomenon of wind and solar power curtailment.

2.2 Key technologies of new power system. Virtual power plants, as one of the key technologies of the new power system, achieve flexible regulation of electricity by aggregating distributed energy resources. The aggregation optimization algorithm based on multi-agent system can effectively improve the aggregation capacity of distributed energy. After applying this algorithm in a virtual power plant containing 100 distributed energy nodes, the

aggregated capacity increased by 40%, achieving higher energy utilization efficiency and economic benefits.

The economic analysis of energy storage systems is crucial for the development of new power systems. Establish a full lifecycle cost model, considering the costs of equipment procurement, installation, operation and maintenance, retirement treatment, as well as the benefits of energy storage systems in peak shaving, frequency regulation and other scenarios, to calculate the internal rate of return (IRR) of energy storage systems. Taking lithium battery energy storage as an example, in peak shaving scenarios, its IRR is 8.7 %, indicating that under current cost and benefit conditions, lithium battery energy storage has certain investment feasibility. With technological advancements and cost reductions, the economy of energy storage systems will further improve.

2.3 Energy Efficiency Enhancement Technology

Matrix. Industrial motor systems are one of the main energy consuming equipment in the industrial field, and retrofitting them can significantly improve energy efficiency. Using EPLAN software for energy efficiency analysis can accurately evaluate the energy consumption status of the motor system and propose targeted renovation plans. In the motor system renovation project of a certain steel enterprise, measures such as adopting efficient motors and optimizing control systems were taken, resulting in a comprehensive efficiency improvement of 12–15 % and an annual savings of 2 million yuan in electricity expenses.

Building energy conservation is an important field for achieving efficient energy utilization. Based on TRNSYS software simulation analysis, the intelligent temperature control system can automatically adjust the operating status of air conditioning, lighting and other equipment according to indoor and outdoor environmental parameters, effectively reducing building energy consumption. After installing an intelligent temperature control system in a commercial building, the building's energy consumption decreased by 23 % while improving indoor comfort. By promoting technologies such as intelligent temperature control systems and energy-saving doors and windows, the development of building energy conservation can be further promoted.

3. Optimization path of energy security strategy

3.1 Multi energy complementary system planning.

The design of regional energy internet is the key to realize multi energy complementation. Taking a new urban area as an example, establishing a multi energy flow coupling model that includes gas electricity, solar thermal, and energy storage can effectively solve the optimal configuration scheme. By optimizing the capacity configuration of natural gas distributed energy, solar thermal systems, and energy storage devices, energy utilization efficiency can be improved and energy supply costs can be reduced. In this model, the objective function is:

$$\max \sum_{i=1}^n E_i - \sum_{j=1}^m C_j,$$

E_i is the benefit of the i -th type of energy, which may include power generation revenue, energy substitution benefits, environmental benefits (such as reducing carbon emissions), etc.

C_j is the construction and operation cost of the j -th facility, including initial investment, maintenance costs, fuel costs, etc.

The constraints include energy supply and demand balance constraints, equipment capacity constraints, energy conversion efficiency constraints, etc. By solving the model, the optimal configuration of a distributed natural gas energy installed capacity of 50 MW, a solar thermal collector area of 100000 square meters, and an energy storage device capacity of 20 MWh can be obtained, which reduces the regional energy supply cost by 12 %.

Hydrogen energy, as a clean energy source, has a significant impact on energy security strategies due to its storage and transportation economy. Constructing a cost model for the “green hydrogen” supply chain, considering the costs of hydrogen production through electrolysis, hydrogen transportation, storage, and other links, can calculate the hydrogen cost per kilowatt hour for a transportation radius of 500 kilometers. When using liquid hydrogen transportation and the electricity price for hydrogen production through electrolysis of water is 0.5 yuan/kWh, after comprehensive calculation of equipment depreciation, operation and maintenance costs, the cost of hydrogen production is 35 yuan/kg. Through technological innovation and large-scale development, it is expected to reduce the cost of hydrogen production and transportation, enhance the competitiveness of hydrogen energy in the energy market, and provide more choices for energy security strategies.

3.2 Innovation of electricity market mechanism.

Capacity compensation mechanism is an important means to ensure the reliability of the power system. Establish a reliability based capacity pricing model that considers factors such as system reserve capacity demand and unit availability, and can calculate reasonable capacity compensation standards. Taking a provincial power grid as an example, the reasonable compensation standard calculated through this model is 0.08 yuan/kWh. The implementation of capacity compensation mechanism can incentivize power generation enterprises to invest in the construction of backup power sources, improve the reliability of the power system, and ensure energy security and stable supply.

The analysis of the linkage effect between the carbon market and the electricity market is of great significance for achieving the “dual carbon” goal. Apply CGE model to simulate the impact of electricity carbon quota trading on system costs. When the carbon price is 50 yuan/ton, the cost of the power system will increase by 3.5 %. The linkage between the carbon market and the electricity market can guide power companies to reduce carbon emissions, optimize energy structure, promote green and low-carbon energy transformation, and also promote the healthy development of the carbon market, improving the efficiency of energy resource allocation.

3.3 Digital twin decision support. The energy security warning system is an important tool for ensuring energy security. Develop a risk warning platform based on digital twins, with 12 core monitoring indicators including energy supply and demand balance, energy price fluctuations, and energy infrastructure operation status, which can achieve real-time monitoring and warning of energy security risks. When the monitoring indicators exceed the set threshold, the system will promptly issue an alarm to provide decision support for the energy management department and take corresponding measures to reduce risks.

Policy effect simulation is an important means of evaluating the effectiveness of energy policies. Use AnyLogic software to evaluate the synergistic effects of various policies under the “dual carbon” target. The simulation results show that under the synergistic effect of policies such as carbon tax, carbon trading, and renewable energy subsidies, the carbon emission intensity can be reduced by 45 % by 2030, the energy consumption structure will be significantly optimized, and the proportion of clean energy will increase to 35 %, providing strong support for achieving the “dual carbon” goal. By simulating policy effects, policy combinations can be optimized, policy implementation effectiveness can be improved, and the smooth implementation of energy security strategies can be promoted.

4. Empirical research and case analysis

4.1 Outward transmission plan for northwest new energy base. To effectively enhance the power transmission capacity of the Northwest New Energy Base and reduce the rate of wind and solar power curtailment, we have constructed a direct current transmission network model consisting of seven provincial power grids. This model comprehensively considers the different types and capacity ratios of power sources at the sending end, as well as the power consumption capacity and load characteristics of the receiving end power grid, and solves the optimal power configuration and transmission scheme through optimization algorithms.

In the optimization of power supply ratio at the transmission end, we have established a multi-objective optimization model with the goal of reducing wind and solar power curtailment rates and improving transmission efficiency. The objective function is:

$$\min \left(\alpha \cdot \frac{C^{\frac{1}{4}} \cdot L^{\frac{1}{4}}}{\eta_0} \right) + (1 - \alpha) \cdot \left(\alpha \cdot \frac{1}{\eta^{\frac{3}{4}} \cdot L^{\frac{1}{4}} \cdot \eta_0} \right),$$

α is the weight coefficient ($0 \leq \alpha \leq 1$) is used to balance two objectives.

C is the abandoned wind and solar power rate (proportion of unused new energy generation).

L is the transmission losses or line related parameters.

η is the transmission efficiency.

η_0 is the normalized reference constant (such as reference efficiency or capacity).

The constraints include power output constraints, transmission line capacity constraints, and end grid load

balancing constraints.

By solving the model, we obtained the optimal power supply ratio scheme for the transmission end: wind power installed capacity of 30 million kilowatts, photovoltaic installed capacity of 20 million kilowatts, and thermal power installed capacity of 10 million kilowatts. In the optimization of the receiving end consumption plan, we have developed a reasonable power distribution plan based on the load forecast and power demand of each provincial power grid, ensuring that the transmitted power can be effectively consumed in the receiving end power grid.

The calculation results show that after adopting the optimal configuration scheme, the wind and solar curtailment rate can be reduced to 3.2 %, a decrease of 10 percentage points compared to before optimization; The transmission efficiency has increased by 18 %, reaching a higher level of energy transmission. The implementation of this plan will effectively improve the energy utilization efficiency of the Northwest New Energy Base, promote the large-scale development and utilization of clean energy, and make positive contributions to China's energy structure adjustment and energy security guarantee.

4.2 Energy storage planning for the Yangtze River Delta load center. With the rapid development of the economy in the Yangtze River Delta region, the demand for electricity continues to grow, and the peak valley difference of power grid load continues to increase. In order to improve the stability and reliability of the power grid and reduce peak loads, we have established an energy storage configuration model that considers demand response, and solved for the optimal energy storage capacity of the Shanghai power grid in 2030.

In the model, we consider the role of demand response by incentivizing users to adjust their electricity consumption behavior, achieving peak shaving and valley filling, and reducing the load pressure on the power grid. The demand response model adopts a price based demand response mechanism, and users adjust their electricity demand based on real-time electricity price signals. The elasticity coefficient of demand response is determined through historical data and user research to reflect the sensitivity of users to changes in electricity prices.

The energy storage configuration model takes the lowest total system cost as the objective function, considering the investment cost, operation and maintenance cost, retirement treatment cost of energy storage equipment, as well as the benefits of grid investment savings and energy cost reduction caused by the operation of energy storage systems. The objective function is:

$$\min(C_{inv} + C_{om} + C_{decom} - B_{grid} - B_{energy})$$

C_{inv} is the energy storage investment cost.

C_{om} is the operation and maintenance costs.

C_{decom} is the retirement processing cost.

B_{grid} is the power grid investment savings.

B_{energy} is the energy cost reduction.

The constraints include physical limitations of the energy storage system, capacity and power capacity constraints, charging and discharging power balance

constraints, grid operation constraints, demand response correlation constraints, etc.

By using optimization algorithms to solve the model, we obtained the optimal energy storage capacity configuration plan for Shanghai Power Grid in 2030: configuring 12 GW of energy storage. This configuration can effectively reduce peak loads by 15 % and alleviate power supply pressure on the grid; Meanwhile, by reducing investment in power grid expansion and optimizing energy utilization, approximately 26 billion yuan in system investment can be saved. By reasonably configuring energy storage and implementing demand response, the operational efficiency and reliability of the power grid in the Yangtze River Delta region will be improved, ensuring regional energy security and stable supply.

4.3 Offshore wind power hydrogen production demonstration project

To promote the efficient utilization of offshore wind power and explore diversified development paths of clean energy, we have designed an integrated system of "offshore wind power+green hydrogen" and established a full process technical and economic model to analyze the technical feasibility and economic rationality of the demonstration project.

The integrated system for offshore wind power hydrogen production mainly includes offshore wind farms, electrolytic water hydrogen production units, hydrogen storage and transportation systems, etc. In the technical model, we considered key factors such as the power characteristics of offshore wind power, the efficiency and energy consumption of hydrogen production through electrolysis, and the storage and transportation methods of hydrogen. We established mathematical models for each link and conducted system integration and simulation analysis.

The economic model takes the lowest cost of green hydrogen as the objective function, considering factors such as offshore wind power construction costs, investment in electrolytic water hydrogen production equipment, operation and maintenance costs, hydrogen storage and transportation costs, as well as wind power grid prices and hydrogen sales prices. The objective function is:

$$\min \left(\frac{C_{cap,wind} + C_{cap,electrolyzer} + C_{om} + C_{stor.} + C_{transp.}}{QH_2} + C_{electricity} \cdot eH_2 \right)$$

$C_{cap,wind}$ is the investment cost of offshore wind power construction.

$C_{cap,electrolyzer}$ is the investment cost of electrolytic water hydrogen production equipment.

C_{om} is the operation and maintenance cost.

$C_{stor.}$ is the storage cost.

$C_{transp.}$ is the transportation cost.

$C_{electricity}$ is the electricity cost (unit hydrogen consumption cost, yuan/kg- H_2).

QH_2 is the annual hydrogen production (kg- H_2), determined by wind power output and electrolysis efficiency.

eH_2 is the electricity consumption (energy input) required to produce one unit (kilogram) of hydrogen (H_2).

The constraints include wind power output constraints, electrolytic cell operation constraints, and storage and transportation capacity constraints.

Through economic calculations, when the wind power price drops to 0.3 yuan/kWh, the cost of green hydrogen can be reduced to 35 yuan/kg. This cost level has certain competitiveness in the current energy market, and with the advancement of technology and the emergence of economies of scale, the cost of green hydrogen is expected to further decrease. The implementation of the offshore wind power hydrogen production demonstration project

will provide valuable experience for the consumption of offshore wind power and the development of green hydrogen industry in China, promoting the green and low-carbon transformation of energy and the improvement of energy security guarantee level.

5. Comprehensive Development Strategy Framework

5.1 Technical breakthrough roadmap. There are numerous bottleneck technologies that constrain China's energy security, posing significant challenges to the independent and controllable development of the energy industry. Table 1 shows 10 key technologies and their research and development paths.

Table 1 – Key technologies and their research and development paths

Technical field	Technical name	Research and Development (R&D) Path
Energy extraction	Efficient deep oil and gas extraction technology	Joint research institutions and enterprises will carry out industry university research cooperation, focusing on researching high-temperature and high-pressure resistant mining materials and equipment. The plan is to achieve key technological breakthroughs within 5 years and large-scale applications within 10 years
	Segmented fracturing technology for shale gas horizontal wells	Establish a special scientific research fund to support joint research and development between universities and enterprises, develop high-precision fracturing design software and advanced fracturing equipment, with the goal of achieving technological breakthroughs within 3 years and promoting their application within 5 years
Energy transmission	Converter valve technology for ultra-high voltage direct current transmission	Increase R&D investment, introduce advanced foreign technology talents, cooperate with international research teams, improve the reliability and capacity of converter valves, and expect to overcome core technologies within 4 years and achieve domestic substitution within 6 years
	Insulation material technology for submarine cables	Organize industry enterprises to establish joint research and development centers to conduct basic and applied research, develop high-performance insulation materials, and strive to complete technical research and development within 3 years and achieve industrial production within 4 years
Energy storage	Solid state battery technology	Encourage enterprises to increase R&D investment, establish R&D laboratories, cooperate with universities and research institutions, and break through key technologies such as solid-state electrolytes. The goal is to achieve technological maturity within 5 years and large-scale application within 8 years
	Large capacity compressed air energy storage technology	Establish national key research and development projects, integrate advantageous scientific research resources, overcome efficient operation control technology and low-cost material technology of energy storage systems, plan to achieve key technological breakthroughs within 4 years, and construct demonstration projects within 6 years
Energy conversion	Efficient solar cell technology	Support research institutions to conduct cutting-edge research, encourage enterprises to establish research and development centers, develop new photovoltaic materials and battery structures, and strive to improve battery conversion efficiency within 3 years and achieve industrialization within 5 years
	Efficient biomass gasification technology	Increase investment in biomass energy research, establish demonstration bases, develop efficient gasifiers and catalysts, with the goal of achieving technological breakthroughs within 4 years and promoting their application within 6 years
Energy monitoring	Energy Internet security protection technology	Strengthen research on network security technology, establish an energy network security laboratory, develop intelligent monitoring and protection systems, form preliminary technological achievements within 2 years, and promote application within 3 years
	Smart meter chip technology	Concentrate the strength of advantageous enterprises, carry out technological breakthroughs, break through key technologies in chip design and manufacturing, achieve chip localization within 3 years, and improve chip performance within 5 years

In order to achieve breakthroughs in the above-mentioned technologies, it is recommended to allocate 0.8 % of gross domestic product (GDP) to energy and power technology research and development. Based on the total GDP of 126.05 trillion yuan in China in 2023, the investment in energy and power technology research and development should reach 1008.4 billion yuan. By continuously and steadily investing funds, attracting outstanding talents, purchasing advanced equipment, and strengthening international cooperation, it is expected to make significant breakthroughs in key technological fields and enhance the technical guarantee level of China's energy security.

5.2 Infrastructure investment planning. The optimization of power grid investment is crucial for improving energy transmission efficiency and ensuring energy security. Applying genetic algorithm to solve the optimal timing of power grid construction from 2025 to 2035, taking a regional power grid as an example, which includes 10 substations and 15 transmission lines, the goal is to minimize the construction and operation costs of the power grid while meeting the growing demand for electricity.

The encoding method of genetic algorithm adopts binary encoding, representing the construction timing of each substation and transmission line as a gene locus. The initial population is randomly generated, and the fitness function is used to evaluate the strengths and weaknesses of each individual. The fitness function considers factors such as power grid construction costs, operating costs, and power supply reliability. The selection operation adopts the roulette wheel selection method, the crossover operation adopts single point crossover, and the mutation operation adopts positional mutation.

After multiple iterations of calculation, the optimal timing scheme for power grid construction has been obtained. Prioritize the construction of key transmission lines in 2025–2027 to meet the recent increase in electricity demand; From 2028 to 2030, construct some substations and optimize the layout of the power grid; From 2031 to 2035, further improve the construction of transmission lines and substations to enhance the power supply capacity and reliability of the power grid. By optimizing the construction schedule, the total cost of power grid construction can be reduced by 18 %, while improving the reliability of power supply.

According to the electricity demand forecast and power grid development plan, China needs to increase its power grid investment by 4.2 trillion yuan in the next decade. Among them, the investment in the ultra-high voltage transmission project is 1.2 trillion yuan, mainly used to construct cross regional transmission channels and improve the ability to optimize the allocation of energy resources. An investment of 2 trillion yuan will be made in the renovation of the distribution network, with a focus on improving the power supply quality and reliability of urban and rural distribution networks; The investment in smart grid construction is 1 trillion yuan, which will be used to promote the application of advanced information technology and automation technology, and improve the intelligence level of the power grid. Through large-scale

investment in the power grid, a stronger, smarter, and more reliable power grid will be built, providing a solid infrastructure guarantee for energy security.

5.3 Design of policy guarantee system. Establish a dynamic policy evaluation model and set 15 policy effectiveness evaluation indicators, including energy consumption structure optimization indicators (such as the proportion of clean energy and coal consumption), energy utilization efficiency indicators (such as energy consumption per unit of GDP and energy processing and conversion efficiency), and energy supply security indicators (such as oil and gas dependence on foreign countries and electricity supply reliability). Set reasonable adjustment thresholds for each indicator based on policy objectives and actual situations.

Propose a combination of eight policy tools, including carbon tax and green finance, to promote the implementation of energy security strategies. The carbon tax policy imposes taxes on carbon emissions, increases the cost of using fossil fuels, incentivizes companies and society to reduce carbon emissions, and promotes the transformation of the energy structure towards low-carbon. Green finance policies include green loans, green bonds, green insurance, etc., which guide the flow of funds towards clean energy, energy conservation and consumption reduction through financial means, and support the green development of the energy sector.

The renewable energy subsidy policy continues to provide subsidies for renewable energy generation such as wind power and photovoltaics, reducing the cost of renewable energy generation and improving its market competitiveness; The policy of controlling the total amount of energy consumption sets an upper limit on the total amount of energy consumption, strengthens the control of energy consumption, and promotes energy conservation and efficient utilization; The energy price reform policy gradually improves the mechanism for forming energy prices, reflecting the scarcity of energy and environmental costs, and guiding rational energy consumption; Industrial policies encourage energy enterprises to increase investment in technological innovation, support the development of energy equipment manufacturing industry, and enhance the core competitiveness of the energy industry; Strengthen strategic energy reserves such as oil and natural gas through energy reserve policies, and enhance the ability to cope with energy supply disruptions; The international cooperation policy actively participates in international energy cooperation, strengthens communication and coordination with energy producing and consuming countries, and maintains stability in the international energy market. By comprehensively utilizing these policy tools, a policy synergy is formed to promote the effective implementation of China's energy security strategy.

Conclusions. The article proves that China's modern energy system remains vulnerable due to its overdependence on traditional energy sources, in particular coal (56.4 % of energy consumption) and imported oil (72.6 %), which poses significant threats to energy security in the context of geopolitical instability and climate challenges. The introduction of innovative

technologies, such as smart grids, ultra-high voltage lines, virtual power plants and energy storage systems, can improve the efficiency of energy transmission by 18 %, increase the total capacity of virtual stations by 40 % and achieve an internal rate of return (IRR) in lithium batteries of 8.7 %. Economic calculations confirm the feasibility of developing hydrogen energy: the cost of transporting green hydrogen 500 km is 35 yuan/kg, and the compensation tariff is 0.08 yuan/kW. Practical results also confirm the effectiveness of the proposed solutions: the failure rate of new power lines in northwestern China has dropped to 3.2 %, and the use of 12 GW of storage in the Yangtze Delta has reduced peak load by 15 %. In addition, the cost of hydrogen production from offshore wind power decreased to 0.3 yuan/kWh. In order to achieve long-term energy stability, the article proposes to invest 0.8 % of GDP in scientific and technological development, to provide for the modernization of power grids worth 4.2 trillion yuan in the next decade, and to create an adaptive political monitoring system. Overall, the study forms a systematic technical approach to strengthening China's energy security in the context of the global energy transition.

References

1. National Bureau of Statistics of China, *China Statistical Yearbook 2024*. Beijing: China Stat. Publ. House, 2024. [Online]. Available: <https://www.stats.gov.cn/sj/ndsj/2024/indexeh.htm>
2. General Administration of Customs People's Republic of China, *China Customs Statistics*. Beijing: General Admin. Customs People's Republic China. [Online]. Available: <http://english.customs.gov.cn/Statistics/Statistics>
3. "Summary of China's energy and power sector statistics in 2024." China Energy Transformation Program. [Online]. Available: <https://www.cet.energy/2025/03/13/summary-of-chinas-energy-and-power-sector-statistics-in-2024/>
4. The State Council Information Office of the People's Republic of China, "China's energy transition", 新华社, Aug. 2024. [Online]. Available: http://www.scio.gov.cn/zfbps/zfbps_2279/202408/t20240829_860523.html
5. G. Lu, N. Zhu, K. Zhang, and Z. Dai, "Intelligent optimization method for time period of power grid operation based on knowledge model", in *2023 IEEE 4th China International Youth Conference on Electrical Engineering (CIYCEE)*, Chengdu, China, Dec. 8–10, 2023. IEEE, 2023, doi: <https://doi.org/10.1109/ciycee59789.2023.10401501>
6. K. Zhang, L. Tan, S. Chen, S. Han, D. Zhang, and M. Xu, "Research on key technologies of power system automation application under smart grid", *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 514, Jul. 2020, Art. no. 042062, doi: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/514/4/042062>
7. S. Chen, Y. Ding, Y. Song, M. Zhang, and R. Nie, "Study on China's energy system resilience under the scenarios of long-term shortage of imported oil", *Energy*, vol. 270, Feb. 2023, Art. no. 126831, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.126831>
8. J. Li, H. Sun, L. Cheng, and L. Chu, "The path driving china's energy structure transformation from the perspective of policy tools", *Sustainability*, vol. 16, no. 19, Oct. 2024, Art. no. 8703, doi: <https://doi.org/10.3390/su16198703>
9. H. Peng, C. Qu, V. J. Karplus, and D. Zhang, "The C-REM 4.0 model: A CGE model for provincial analysis of China's carbon neutrality target", *Energy and Climate Management*, vol. 1, no. 1, May 2024, Art. no. 9400006, doi: <https://doi.org/10.26599/ecm.2024.9400006>
10. M. Segovia and J. Garcia-Alfaro, "Design, modeling and implementation of digital twins", *Sensors*, vol. 22, no. 14, Jul. 2022, Art. no. 5396, doi: <https://doi.org/10.3390/s22145396>

Received (надійшла) 23.06.2025

UDC 621.31

ДАНИЛЬЧЕКО ДМИТРО ОЛЕКСІЙОВИЧ – кандидат технічних наук, доцент, старший дослідник, професор кафедри передачі електричної енергії, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7912-1849>; e-mail: dmytro.danylenchenko@kpi.edu.ua.

ГУЙЧУАНЬ ЯН ✉ – здобувач вищої освіти другого (магістерського) рівня кафедри передачі електричної енергії, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-7758-9900>; e-mail: yang.guichuan@ieec.khpi.edu.ua.

ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ ТА СТРАТЕГІЧНОГО ШЛЯХУ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ БЕЗПЕКИ КИТАЮ З ТОЧКИ ЗОРУ НОВИХ ДОСЯГНЕНЬ В ЕЛЕКТРОТЕХНІЦІ

У статті представлено комплексне дослідження енергетичної безпеки Китаю з техніко-економічної точки зору, з урахуванням сучасних викликів і стратегічних цілей енергетичного переходу. Основна увага приділена кількісному аналізу структурних проблем, що загрожують стабільності енергетичної системи. Зокрема, на основі даних 2023 року встановлено, що структура енергоспоживання залишається залежною від викопного палива: частка вугілля становить 56,4 %, а імпортна залежність нафти — 72,6 %. Крім того, виявлено ймовірність перевантаження електричних мереж за екстремальних погодних умов на рівні 7,3 %, що вказує на вразливість системи до кліматичних змін. У дослідженні змодельовано ефективність впровадження технологій Smart Grid, які дозволили підвищити ефективність передавання енергії надвисокою напругою на 18 %. Також зафіксовано приріст сукупної потужності віртуальних електростанцій на 40 % і підвищення внутрішньої норми доходності систем зберігання енергії на базі літєвих акумуляторів до 8,7 %. З погляду довгострокового стратегічного планування, запропонована модель мультиенергетичних потоків оцінює вартість транспортування 500 км зеленого водню на рівні 35 юанів/кг, а також формує стандартизований механізм компенсації потужності (0,08 юанів/кВт). Емпіричні результати підтверджують доцільність таких заходів: рівень відмови від нових ліній електропередавання у північно-західних регіонах знижено до 3,2 %, а впровадження систем зберігання енергії потужністю 12 ГВт у дельті Янцзи дозволило зменшити пікове навантаження на 15 %. Також продемонстровано, що собівартість виробництва водню з офшорної вітроенергетики досягла 0,3 юаня/кВт·год, або 35 юанів/кг з урахуванням ринкових тарифів на електроенергію. У статті запропоновано стратегічні заходи для забезпечення енергетичної безпеки, зокрема інвестиції в науково-технічні розробки у розмірі 0,8 % ВВП, модернізацію електромереж з обсягом фінансування у 4,2 трильйона юанів на найближчі 10 років, а також створення адаптивної системи політичного моніторингу. Надані результати формують основу для системного електротехнічного підходу до забезпечення енергетичної стійкості Китаю в умовах глобальних трансформацій.

Ключові слова: енергетична безпека; електротехніка; Smart grid; мультиенергетична взаємодоповнюваність; цифровий двійник.

VOLODYMYR ZINOVKIN ✉ – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Professor of the Department of Electric Drive and Commercial Plant Automation, National University “Zaporizhzhia Polytechnic”; Zaporizhzhia, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-7667-0658>; e-mail: znvvv@ukr.net.

ANDRII TRETIKOV – Postgraduate Student of the Department of Electric Drive and Commercial Plant Automation, National University “Zaporizhzhia Polytechnic”; Zaporizhzhia, Ukraine.

STUDY OF PHASE REACTANCES OF SPECIAL-PURPOSE TRANSFORMERS DURING DIAGNOSTICS OF THE EXCITATION SYSTEM OF THE ELECTROMAGNETIC SCATTERING FIELD

The study of phase reactances of special-purpose transformers was conducted for the diagnostics of electromagnetic scattering excitation systems. Special attention is paid to assessing the technical condition of power transformers that supply energy-intensive technological complexes, as the current and voltage in them change according to complex periodic laws, leading to asymmetrical modes and accidents. To improve the reliability of transformer equipment, there is a need to develop specialized microprocessor and software tools for automated analysis and prevention of failures. Accident analysis has shown that electromagnetic scattering excitation systems are the most frequently damaged elements. A methodology for investigating the phase short-circuit resistances of power transformers with complex galvanic winding connections without disassembling the tank is proposed. The research aims to obtain reliable information about the current technical condition of transformer windings based on measured external parameters. The scientific novelty lies in establishing analytical dependencies between interphase short-circuit resistances and phase resistances. The developed program algorithm for automated analysis of winding conditions was implemented in “Turbo Pascal”. Experimental studies on a TRDN-63000/150/35 transformer confirmed the accuracy of the methodology and revealed deformation of the low voltage winding. The predominant causes of winding damage include charring and polymerization of inter-turn insulation due to excessive electrical load. The proposed method allows for the detection of deformations without disassembling transformers, which is useful in multi-parameter diagnostic systems to prevent emergencies. Further research is needed to integrate this approach with other diagnostic and automation methods. The methodology can be applied to multi-winding transformers with a “star-delta-delta” winding connection scheme.

Keywords: power transformer; phase reactance; diagnostics; electromagnetic scattering; automated analysis; winding damage.

Introduction. In the process of operation and maintenance of electrical equipment and, to a large extent, power transformers, very responsible attention is given to the assessment of the current technical condition [1–10] and methods of processing the results of the experiment [11–13]. A special attention is paid to these issues when power supply of power-consuming technological complexes, such as arc and induction steelmaking furnaces, rolling mill drives, DC lines and inserts, etc. is carried out from general-purpose power transformers [14–23]. Their development result was carried out according to the requirements of state standards and normative-technical documentation in which current and voltage change in time according to the periodic law

$$I = I_m \sin(\omega t + \phi).$$

Non-significant overloads are strictly limited in multiples and duration due to the limitation of electromagnetic and high-voltage processes, the excess of which leads to reliability degradation [23–26, 28].

When powering energy-intensive electrical process plants in transformers, current and voltage vary in time according to complex periodic laws

$$I_{\Sigma} = I_0 + \sum_{v=1}^{v=N} I_v \sin(\omega_v t + \phi_v).$$

In the literature, such regimes are called sharply variable [13–16].

For more efficient utilisation of electrical energy and technologies, power transformers with split low-voltage windings are used. This allows, on the one hand, to forcibly

redistribute the power between electrical and technological installations, and on the other hand leads to the emergence of asymmetrical modes and the formation of a number of undesirable causal factors that lead to cumulative effects and subsequent accidents. Therefore, to improve the reliability of transformer equipment, the requirements of practice formed the need to develop specialised microprocessor and software devices for automated analysis of the current technical condition and prevention of emergency failures.

For a clearer representation of the investigated problem, Fig. 1 shows a general view of one of the power transformers that supply energy-intensive technological installations, and Fig. 2 and 3 show oscillograms of one of the sharply variable modes [23–26] and a fragment of the deformation of the excitation system of the electromagnetic dissipation field of the transformer.

Analysis of the accident rate of electrical equipment has shown that the most damaged elements of such transformers are the excitation systems of the electromagnetic dissipation field, one of the fragments of which is shown in Fig. 2, and Fig. 3 shows oscillograms of currents that took place in the transformer when feeding an arc steelmaking furnace [23–27].

It should be noted that in electrical equipment and power transformers there are excessive additive and total losses in relation to those allowed by normative and technical documentation, increased electrodynamic forces and loss of electrodynamic stability of the excitation systems of the electromagnetic dissipation field.



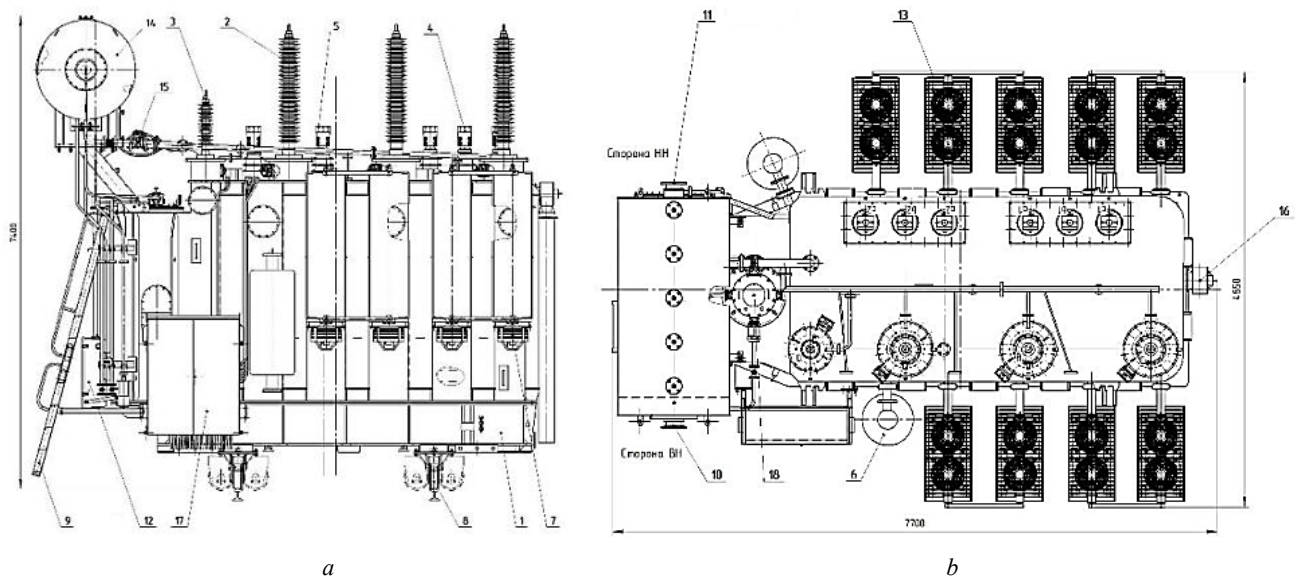


Figure 1 – General view of a power oil transformer type TRDN-63000/150/35 with split low-voltage windings (a) and arrangement of cooling and on-load tap-changer systems (b)

1 is a transformer tank; 2 is a bushing of high-voltage windings (HV); 3 is a bushing of neutral of HV winding; 4 and 5 are bushings of low-voltage (LV) windings HH1 and HH2, respectively; 6 is a thermosiphon filter; 7 is a fan; 8 is a carriage; 9 is a ladder; 10 is an oil indicator in on-load tap-changer (OLTC) oil conservator; 11 is an oil indicator in transformer tank conservator; 12 is an OLTC electric drive; 13 is an oil cooler; 14 is an oil conservator; 15 is a Buchholz relay; 16 is an emergency valve; 17 is a control cabinet; 18 is an OLTC

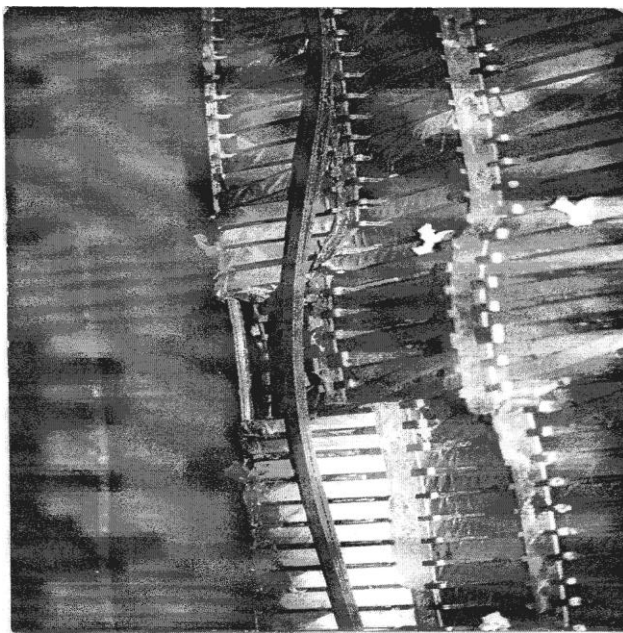


Figure 2 – Fragment of transformer winding deformation feeding arc steelmaking furnaces

Numerous exceedances of current and voltage multiples, excessive local overheating of inactive and active parts of the structure and loss of electrodynamic stability lead to emergency transformer failures and significant technical and economic damages [27].

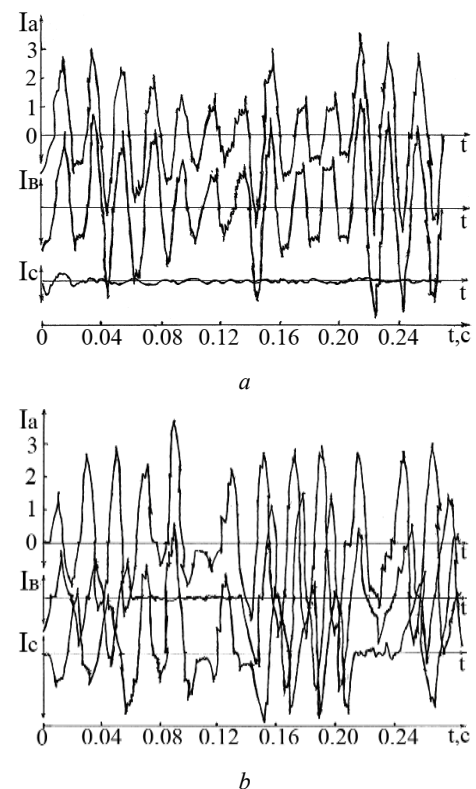


Figure 3 – Oscillograms of sharply alternating currents in the LV windings of a network transformer of typical capacity 63 MVA in the mode of two-phase (a) and alternating technological short circuit (b)

For this reason, the accident rate of transformers operating under such conditions was significantly higher than in general-purpose systems. For more optimal energy

supply of individual technical objects, the transformers have split low-voltage windings. The high-voltage phase windings are galvanically connected in a delta in the tank, and the leads are located on the tank surface. Each of the low voltage windings are delta connected inside the tank and the leads are located on the tank. This does not allow direct measurement and control of phase resistances and reactances during revisions, various repair works and control of current technical condition of winding transformers.

The existing methods of determining the current technical condition of transformer equipment are based on the methods of analysing insulation, partial discharges in the tank volume, chromatographic analysis of transformer oil, short-circuit resistance measurement, general background noise (spectral composition is not controlled), tank vibration, local overheating measurements, etc. The most acceptable scientific and technical approach to analysing the current technical condition of transformers is the simultaneous analysis of the most informative electromagnetic parameters, which change with the formation of initial deviations in the design, as well as the influence of external factors. These include three-level and multilevel methods of analysing the current technical condition of transformer equipment and forced shutdown in the presence of preconditions of emergency failure [23–29].

The present work deals with the methodology of investigating the phase short-circuit resistances of power transformers with complex galvanic connections of the windings without disassembling the tank. The technical difficulty in solving the issue is that it is not possible to measure the phase reactances directly. Therefore, the first step is to consider a mathematical model to convert the phase-to-phase resistances in the short-circuit experience to phase resistances. Then it is necessary to identify the reactive component by the dynamics of its change to determine the initial deviations in them (winding pairs). Then, on the basis of a series of measurements of various combinations of winding pairs, it is possible to predetermine the formation of deviations in a particular winding.

The relevance of the work is demanded by the urgent need of practice – obtaining reliable information on the formation of initial deviations in the excitation system of the electromagnetic scattering field to prevent emergency failures of transformers.

The goal of research is to develop a methodology for obtaining reliable information on the current technical condition of power transformer windings based on measured external load parameters.

The object of research is the system of excitation of electromagnetic field of scattering at scheme of galvanic connections of windings “star-delta-delta”.

Scientific novelty consists in the establishment of analytical dependences between interphase short-circuit resistances to phase resistances of power transformers with the subsequent development of an algorithm for bringing interphase to internal phase reactive components of resistances.

Research Results. To determine the current technical condition of power transformers, a number of methods are used, which are based on the measurement of partial

discharges, overvoltages, vibration processes, multilevel diagnostic systems, the influence of the quality of electrical energy, control of dielectric properties of transformer oil and others. [20–24]. As analyses of the results of transformer equipment failure have shown, the most common cause of failure is windings. During operation they are subjected to thermal, electrodynamic, electromagnetic and high-voltage influences. As a result, there is accelerated ageing of insulation, partial compression, formation of initial winding deformations and, finally, loss of electrodynamic resistance with subsequent accident development. Therefore, the most effective method of accident prevention is to analyse the current technical condition of windings, but there is no denying the use of other approaches depending on the needs of practice.

Let's consider the physical process of transferring electrical energy from the high voltage windings to the split low voltage windings. The high-voltage windings are galvanically connected in a star inside the tank and the terminals are located on the tank. The low-voltage windings are connected in delta and the terminals are also located on the tank. We consider the scheme of connection of windings of the excitation system of electromagnetic field dissipation “star (HV)-delta(HH1)-delta(HH2)”. In this case, the short-circuit resistance can be represented in the following form:

$$\begin{aligned} Z_{AB}(l, \omega) &= Z_A(l, \omega) + Z_B(l, \omega); \\ Z_{AC}(l, \omega) &= Z_A(l, \omega) + Z_C(l, \omega); \\ Z_{BC}(l, \omega) &= Z_B(l, \omega) + Z_C(l, \omega). \end{aligned}$$

Representing inter-phase short-circuit resistances through phase resistances and solving the resulting system with respect to phase resistances we arrive at the following system:

$$\begin{aligned} Z_A &= [Z_{AB}(l, \omega) + Z_{AC}(l, \omega) - Z_{BC}(l, \omega)] \cdot 0.5; \\ Z_B &= [Z_{AB}(l, \omega) + Z_{BC}(l, \omega) - Z_{AC}(l, \omega)] \cdot 0.5; \\ Z_C &= [Z_{BC}(l, \omega) + Z_{AC}(l, \omega) - Z_{AB}(l, \omega)] \cdot 0.5. \end{aligned}$$

It is known that the short-circuit resistance consists of active $R(l)$ and reactive $X(l, \omega)$ components. Due to the nature of electromagnetic processes, the formation of initial winding deformations will be reflected on the reactive component. Considering that the reactive component also depends on the frequency of the applied voltage, in order to achieve greater accuracy in measurements it is necessary to take into account even the smallest deviations from the specified frequency and temperature according to the following formula:

$$X_{AB}(l, \omega) = [Z_{AB}^2(l, \omega) - R^2(l)]^{0.5} \cdot k_{fT},$$

where $k_{fT} = 1 + f_{50} \cdot f_{on}^{-1}$ is the coefficient of reduction to industrial frequency.

In our case, it is not reasonable to take into account the coefficient of converting the results by temperature, because the temperature affects the active component. In order to obtain reliable results, it is advisable to perform at least three measurements of interfacial resistances and bring them to the same conditions according to the following expressions:

$$X_{AB}(l)_{cp} = \left[\sum_{n=1}^{n=4} X_{AB}(l, \omega)_i \right] : n;$$

$$X_{AC}(l)_{cp} = \left[\sum_{n=1}^{n=4} X_{AC}(l, \omega)_i \right] : n;$$

$$X_{BC}(l)_{cp} = \left[\sum_{n=1}^{n=4} X_{BC}(l, \omega)_i \right] : n;$$

where n is the number of measurements in the short-circuit experiment.

The rod reactances are determined similarly to the above approach using the following relations:

$$X_A(l) = [X_{AB_{cp}}(l) + X_{AC_{cp}}(l) - X_{BC_{cp}}(l)] \cdot 0.5;$$

$$X_B(l) = [X_{AB_{cp}}(l) + X_{BC_{cp}}(l) - X_{AC_{cp}}(l)] \cdot 0.5;$$

$$X_C(l) = [X_{BC_{cp}}(l) + X_{AC_{cp}}(l) - X_{AB_{cp}}(l)] \cdot 0.5.$$

To obtain a reference resistance result, we will use the normalisation technique a:

$$X_T(l) = [X_A(l) + X_B(l) + X_C(l)]/3.$$

By the absolute deviation of the reactance $\Delta X(l)$, we determine the pair of windings used in the experiment, one of which has a deformation:

$$\Delta X_A(l) = [X_A(l) - X_T(l)] : X_T(l);$$

$$\Delta X_B(l) = [X_B(l) - X_T(l)] : X_T(l);$$

$$\Delta X_C(l) = [X_C(l) - X_T(l)] : X_T(l).$$

The above approach was used to assess the technical condition of a power transformer with a typical capacity of 63 MVA.

The algorithm of the programme for automated analysis of the technical condition of the windings of three-phase power transformers by current load parameters is shown in Fig. 4.

Let us consider the sequence of transformation of interphase load parameters (I, U, P f) in the short circuit experience to phase reactances (X, R) of the electromagnetic field excitation system in accordance with the analytical relations and connection scheme.

The programme for converting phase-to-phase reactances to phase reactances was developed in the “Turbo Pascal” language. It was used in the system of automated assessment of technical condition of power multiwinding transformers. It converts the phase-to-phase resistances obtained in the experiment to the industrial frequency and 200 °C temperature. On their basis, the current phase reactances are determined, changes in which inform about the presence of deformations. It consists of five main parts, which are interconnected by a logical sequence. The direct text of the programme is given below.

In the first step the constant coefficients of the measuring instruments and the current values of the measured currents, voltages, power and frequency are set:

$$f_{50} := 50 \quad I_{pr} := 20 \quad N_{pri} := 100 \quad U_{pr} := 50$$

$$N_{pru} := 100 \quad P_{pr} := 100 \quad N_{prp} := 100$$

$$\alpha_i := \frac{I_{pr}}{N_{pri}} \quad \alpha_u := \frac{P_{pr}}{N_{pru}} \quad \alpha_p := \frac{P_{pr}}{N_{prp}} \cdot 0.1$$

$$P_{pr} := I_w U_w$$

$$M := D \backslash Sse \backslash mcd \backslash dat.txt$$

$$M := M^T$$

$$N_{lab} := M^{<1>}$$

$$N_{lbc} := M^{<2>}$$

$$N_{lac} := M^{<3>}$$

$$I_{lab} := \alpha_i \cdot N_{lab}$$

$$I_{lbc} := \alpha_i \cdot N_{lbc}$$

$$I_{lac} := \alpha_i \cdot N_{lac}$$

$$I_{lab} = \begin{pmatrix} 1 \\ 1.1 \\ 1.2 \end{pmatrix}$$

$$I_{lbc} = \begin{pmatrix} 0.8 \\ 1 \\ 1.2 \end{pmatrix}$$

$$I_{lac} = \begin{pmatrix} 1.2 \\ 1 \\ 0.9 \end{pmatrix}$$

$$N_{Uab} := M^{<4>}$$

$$N_{Ubc} := M^{<5>}$$

$$N_{Uac} := M^{<6>}$$

$$U_{ab} := \alpha_u \cdot N_{Uab}$$

$$U_{bc} := \alpha_u \cdot N_{Ubc}$$

$$U_{ac} := \alpha_u \cdot N_{Uac}$$

$$U_{ab} = \begin{pmatrix} 4.5 \\ 4.75 \\ 5 \end{pmatrix}$$

$$U_{bc} = \begin{pmatrix} 5 \\ 4 \\ 4.5 \end{pmatrix}$$

$$U_{ac} = \begin{pmatrix} 5 \\ 5.5 \\ 6 \end{pmatrix}$$

$$N_{Pab} := M^{<7>}$$

$$N_{Pbc} := M^{<8>}$$

$$N_{Pac} := M^{<9>}$$

$$P_{ab} := \alpha_p \cdot N_{Pab}$$

$$P_{bc} := \alpha_p \cdot N_{Pbc}$$

$$P_{ac} := \alpha_p \cdot N_{Pac}$$

$$P_{ab} = \begin{pmatrix} 1.3 \\ 1.2 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$P_{bc} = \begin{pmatrix} 0.8 \\ 0.9 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$P_{ac} = \begin{pmatrix} 1.1 \\ 1.2 \\ 1.3 \end{pmatrix}$$

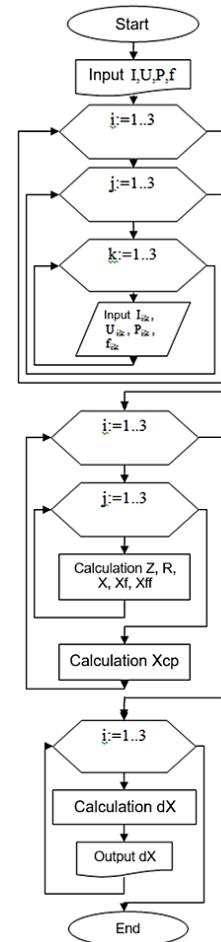


Figure 4 – Algorithm of the programme of reduction of external electromagnetic parameters to phase reactances for estimation of technical condition of the excitation system of the electromagnetic dissipation field of a three-phase transformer with split low-voltage windings

This part of the programme can be partially modernised in relation to the devices to be used, as well as other winding connection schemes.

At the second stage the calculation of interphase rod resistance, its active and reactive components is carried out according to the following expressions:

$$\begin{aligned}
 \text{a. } Z_{ab} &= \overline{\left(\frac{U_{ab}}{I_{ab}}\right)} & R_{ab} &= \overline{\left(\frac{P_{ab}}{I_{ab}^2}\right)} \\
 Z_{ab} &= \begin{pmatrix} 4.5 \\ 4.318 \\ 4.167 \end{pmatrix} & R_{ab} &= \begin{pmatrix} 1.3 \\ 0.992 \\ 0.694 \end{pmatrix} \\
 X_{ab} &= \sqrt{Z_{ab}^2 - R_{ab}^2} & X_{abf} &= \frac{X_{ab1_1} + X_{ab1_2} + X_{ab1_3}}{3} \\
 k_f &= \frac{50}{f_{op}} & X_{abf} &= 1.052 \\
 \text{b. } Z_{ac} &= \overline{\left(\frac{U_{ac}}{I_{ac}}\right)} & R_{ac} &= \overline{\left(\frac{P_{ac}}{I_{ac}^2}\right)} \\
 X_{ac} &= \sqrt{Z_{ac}^2 - R_{ac}^2} & X_{ac1} &= X_{ac} * k_f \\
 X_{acf} &= \frac{X_{ac1_1} + X_{ac1_2} + X_{ac1_3}}{3} \\
 X_{acf} &= 1.328 \\
 \text{c. } Z_{bc} &= \overline{\left(\frac{U_{bc}}{I_{bc}}\right)} & R_{bc} &= \overline{\left(\frac{P_{bc}}{I_{bc}^2}\right)} \\
 Z_{bc} &= \begin{pmatrix} 6.25 \\ 4 \\ 3.75 \end{pmatrix} & R_{bc} &= \begin{pmatrix} 1.25 \\ 0.9 \\ 0.694 \end{pmatrix} \\
 X_{bc} &= \sqrt{Z_{bc}^2 - R_{bc}^2} & X_{bcf} &= \frac{X_{bc1_1} + X_{bc1_2} + X_{bc1_3}}{3} \\
 X_{abf} &= 1.142
 \end{aligned}$$

The third stage of the automated analysis programme allows the technical condition of the power transformer winding pair to be assessed from the current measured parameters. Here the core reactive components of the coresistance are determined on the basis of the interfacial ones according to the following relations:

$$\begin{aligned}
 X_{af} &= \frac{1}{2} \cdot (X_{abf} + X_{acf} - X_{bcf}) \\
 X_{af} &= 0.619 \\
 X_{bf} &= \frac{1}{2} \cdot (X_{abf} + X_{bcf} - X_{acf}) \\
 X_{bf} &= 0.433 \\
 X_{cf} &= \frac{1}{2} \cdot (X_{bcf} + X_{acf} - X_{abf}) \\
 X_{cf} &= 0.709 \\
 X_{cf} &= \frac{(X_{af} + X_{bf} - X_{cf})}{3} \\
 X_{af} &= 0.587
 \end{aligned}$$

At the fourth stage of the programme for automated analysis of the technical condition of the windings of power transformers, the phase reactive components of the short-circuit resistance are adjusted and analysed with respect to the initial ones (or those given in the technical documentation). If such data are not available, it is

necessary to use the method of averaging the data obtained in the experiment according to the following formulae:

$$\begin{aligned}
 \Delta X_a &= \frac{X_{af} - X_f}{X_f} \cdot 100 & \Delta X_a &= 5.399 \\
 \Delta X_b &= \frac{X_{bf} - X_f}{X_f} \cdot 100 & \Delta X_b &= -26.232 \\
 \Delta X_c &= \frac{X_{cf} - X_f}{X_f} \cdot 100 & \Delta X_c &= 20.833
 \end{aligned}$$

```

range(10, up, xa, xb, xc):=
s←""
s←concat(s, "deltaXa") if
(|xa| ≥ lo) ∧ (|xa| < up)
s←concat(s, "deltaXb") if
(|xb| ≥ lo) ∧ (|xb| < up)
s←concat(s, "deltaXc") if
(|xc| ≥ lo) ∧ (|xc| < up)
s←concat(num2str(lo),
"%≤", s, "<",
num2str(up), "%") if
s ≠ ""

```

At the fifth stage of the programme the classification of overhangs (changes) of reactive components of resistance is carried out in the following gradation: from 0,0÷1,0; 1,0÷1,5; 1,5÷2,0; 2,0 and more. These boundary limits indicate the presence of corresponding deviations in the geometrical dimensions of the winding pairs and characterise their technical condition. It is practically unsafe to operate the transformer within the limits of 1.5÷2.0. At such values there are deformations in the windings, at which further operation will lead to loss of electrodynamic stability and emergency condition of the transformer.

The programme grading of exceeding limits of reactive components of resistances takes the following form:

```

range(0, 1.0, ΔXa, ΔXb, ΔXc) = ""
range(1.0, 1.5, ΔXa, ΔXb, ΔXc) = ""
range(1.5, 2.0, ΔXa, ΔXb, ΔXc) = ""
range(2.0, 100, ΔXa, ΔXb, ΔXc) = ""

```

The listing of the programme for determining the technical condition of the windings of a power transformer with split low-voltage windings is shown below:

```

USES crt;
var
i,j,k:integer;
xa,xb,xc,dxa,dxb,dxc,a,Xcp:real;
name: array [1..3] of string;
Xf,Xff,dX:array[1..3] of real;
matr: array[1..3,1..3,1..4] of real;
z,R,X: array[1..3,1..3] of real;
begin
textcolor(white);
name[1]:='ab';name[2]:='ac';name[3]:='bc';
clrscr;
for i:=1 to 3 do
begin
writeln('enter the data for',name[i]);

```

```

for j:=1 to 3 do
begin
writeln('enter sequentially I,U,W,f for 'j,'option');
for k:=1 to 4 do
read(matr[i,j,k]);
end;
clrscr;
end;
for i:=1 to 3 do
begin
for j:=1 to 3 do
begin
Z[i,j]:=matr[i,j,2]/matr[i,j,1];
R[i,j]:=matr[i,j,3]/((matr[i,j,1])*(matr[i,j,1]));
X[i,j]:=(sqrt(z[i,j]*z[i,j]-R[i,j]*R[i,j]))*(50/matr[i,j,4]);
Xf[i]:=Xf[i]+X[i,j]/3;
If i=(4-j)0 then a:=Xf[j]*(-1) else a:=Xf[j];
Xff[i]:=Xff[i]+a;

```

Experimental research was carried out on a power transformer of typical capacity 63 MVA using the methodology given in GOST 3484.3 [30]. On the basis of the obtained research results, which are given in Table 1, it was decided to dismantle the transformer with the conventional designation T3 for revision. Taking advantage of this, it was experimentally measured phase reactances in order to verify the accuracy of the results obtained using the proposed method. In the experiment, this transformer was powered at reduced voltage from the side of a pair of the corresponding high-voltage windings according to the method of GOST 3484.3 [30], with short-circuited corresponding low-voltage windings and schemes of their connection, as shown in Table 1. The results of the study are given in the same table. The results of T1 and T2 transformers corresponded to the passport results. In the experiment, this transformer was powered at reduced voltage from the side of a pair of the corresponding high-voltage windings according to the method of GOST 3484.3

[30], with short-circuited corresponding low-voltage windings and schemes of their connection, as shown in Table 1. The results of the study are given in the same table. The results of T1 and T2 transformers corresponded to the passport results.

A comparative analysis of the results of the studies showed that the discrepancy between the phase reactances in transformers T1 and T2 are within acceptable limits. Recall that in these measurements three windings on each core are used. At transformer T3, when the windings are connected similarly to T1 and T2 (HV-HH1+HH2), some discrepancies between the phase reactances are observed and are +1.19 and -1.27. From these results, it is not possible to determine in which winding the fault occurs. However, these results inform about the presence of a deformation in one of the pair of windings of phases “B” or “C” (The presence of a winding is excluded). The presence of winding short circuits or shorting out of individual windings or disturbance of galvanic connections between the windings would lead to emergency consequences. Therefore, it was decided to perform measurements of paired reactances, the results of which will make it possible to specify the winding damage. In the HV-HH1 circuit mode the deviations in phase reactances reach 2.51 %, and in the HV-HH2 circuit mode the deviations in reactances are +0.86 and -0.33. This indicates that there is damage to winding HH1 of phase “B” and further operation of the transformer is not acceptable.

Dismantling of this transformer confirmed the deformation of winding HH2, which is shown in Fig. 2.

The predominant causes of winding damage are: Charring and polymerisation of the inter-turn insulation due to excessive electrical load in relation to the standard values and, as a consequence, an increase in added losses, local overheating in active and inactive parts of the structure, as well as the development of relaxation and cumulative processes.

Table 1 – Reactive phase resistances of network transformers with typical capacity of 63 MVA, which supplied electrical technological complexes with sharply variable loads

Expert	Transformer No.	Winding connection diagram	Phase	Phase resistances, Ohm.	Averaged resistances Ohm.	Relative deviation, %	Connection diagrams of LV windings in the experiment
1	T1	HV— LV1+LV2	A B C	38,36 pro. 38,36 pro. 38,37 pro.	38,43. pro	0,07. pro. 0,07. pro. 0,08. pro.	LV windings short-circuited
2	T2	HV— LV1+LV2	A B C	38,46 pro. 38,46 pro. 38,46 pro.	38,46. pro	0,00. pro. 0,00. pro. 0,00. pro.	LV windings short-circuited
3	T3	HV— LV1+LV2	A B C	39,03 pro. 39,01. ex. 39,46 pro. 39,39. ex. 39,50 pro. 39,45. ex.	38,99. pro	0,08. pro. <u>1,19.</u> pro. <u>-1,27.</u> pro.	LV windings short-circuited
4	T3	HV — LV1	A B C	71,96 pro. 71,94. ex. 73,85 pro. 73,83. ex. 70,30. pro. 70,27. ex.	72,04. pro	0,11. pro. <u>2,51.</u> pro. <u>-2,41.</u> pro.	LV windings short-circuited
5	T3	HV — LV2	A B C	71,71 pro. 71,69. ex. 72,72 pro. 72,70. ex. 71,86 pro. 71,81. ex.	72,1. pro.	0,54. pro. 0,86. pro. <u>-0,33.</u> pro.	LV2 short-circuited, LV1 is not
The indices ‘pro’ and ‘ex’ denote the results obtained using the developed programme and experimental measurements on the dismantled transformer, respectively							

Conclusions. The obtained research results allow us to formulate the following conclusions.

1. The proposed method of determining phase reactive resistances by current (measured) interphase supply parameters allows to determine the presence of deformations in the corresponding pairs of windings of the excitation system windings of the electromagnetic dissipation field without resorting to disassembly of powerful transformers.

2. It is expedient to use the methodology in multi-parameter systems of automated analysis and diagnostics of the current state of energy-intensive transformers operating in systems with sharply variable loads to prevent emergency failures and technical and economic damages.

3. It is expedient to continue researches with the purpose of integration of this approach with other methods of diagnostics, modern microprocessor and software methods of automation and optimisation of current load in the process of power supply of energy-intensive technological complexes.

4. It is seen that in further researches it is most effective to use physical processes of electromagnetic character such as magnetostrictive, ferroresonance, electrodynamic, formation of streamers of electric field in insulation, etc., which in aggregate reflects the formation of occlusions in the structure and allows to determine the formation and predetermine the further development of pre-accident situations of transformers.

5. The above methodology can be used for multiwinding transformers with star-delta+delta winding connection. For other winding connection schemes, it is necessary to consider the mutual electromagnetic couplings, taking into account the relevant galvanic connections and the subsequent development of the programme and algorithm.

References

1. C. Serafino and A. Cavallini, "Transformer diagnostics and maintenance: Practical indications derived from a large transmission system", *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 41, no. 1, pp. 15–23, Jan. 2025, doi: <https://doi.org/10.1109/mei.2025.10794980>
2. T. Aggarwal, V. Jindal, and J. Singh, "A review of condition monitoring assessment of power transformers insulation", *International Journal of Advanced Research*, vol. 4, no. 10, pp. 1664–1667, Oct. 2016, doi: <https://doi.org/10.21474/ijar01/1977>
3. S. A. Wani, A. S. Rana, S. Sohail, O. Rahman, S. Parveen, and S. A. Khan, "Advances in DGA based condition monitoring of transformers: A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 149, Oct. 2021, Art. no. 111347, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111347>
4. Suwarno and F. Donald, "Frequency response analysis (FRA) for diagnosis of power transformers", in *ECTI-CON2010: The 2010 ECTI International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology*, Chiang Mai, Thailand, May 19–21, 2010. IEEE, 2010, pp. 112–116.
5. H. Ma, T. Saha, J. Seo, J. Chan, and Y. Cui, "PDTools: A toolbox of partial discharge (PD) signal analysis for transformer condition assessment", in *2017 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM)*, Chicago, IL, USA, Jul. 16–20, 2017. IEEE, 2017, doi: <https://doi.org/10.1109/pesgm.2017.8273888>
6. "Dielectric response methods for diagnostics of power transformers", *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 19, no. 3, pp. 12–18, May 2003, doi: <https://doi.org/10.1109/mei.2003.1203017>
7. K. Leauprasert, T. Suwanasri, C. Suwanasri, and N. Poonnoy, "Intelligent machine learning techniques for condition assessment of power transformers", in *2020 International Conference on Power, Energy and Innovations (ICPEI)*, Chiangmai, Thailand, Oct. 14–16, 2020. IEEE, 2020, pp. 65–68, doi: <https://doi.org/10.1109/icpei49860.2020.9431460>
8. S. Shevchenko, D. Danylchenko, and R. Ganus, "Development of thermal model of an oil-filled transformer in Ansys environment", *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Energy: Reliability and Energy Efficiency*, no. 2 (9), pp. 77–83, Dec. 2024, doi: [https://doi.org/10.20998/erec.2024.2\(9\).319068](https://doi.org/10.20998/erec.2024.2(9).319068) (in Ukrainian)
9. D. Danylchenko and A. Potryvai, "System for dynamic prediction of the technical condition of the equipment of a combined electric power system", *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Energy: Reliability and Energy Efficiency*, no. 1 (6), pp. 16–21, Jul. 2023, doi: <https://doi.org/10.20998/2224-0349.2023.01.10> (in Ukrainian)
10. O. Y. Pirotti, O. I. Balenko, V. O. Brechko, M. Y. Huzin, and J. G. Gontar, "Analysis of construction principles and functionality of high-voltage power transformer condition monitoring systems", *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Energy: Reliability and Energy Efficiency*, no. 1 (1), pp. 61–70, Dec. 2020, doi: <https://doi.org/10.20998/2224-0349.2020.01.09> (in Ukrainian)
11. *Nadiinist tekhniki. Terminy ta vyznachennia [Reliability of equipment. Terms and definitions]*, DSTU 2860-94, Instytut problem nadiinosti mashyn i sporud [Institute for Problems of Reliability of Machines and Structures], Kyiv, 1994. (in Ukrainian)
12. *Dependability of Technics. Methods of Estimation Dependability by Operating Data*, DSTU 3004-95, Asotsiatsiia «Nadiinist mashyn ta sporud» [Asotsiatsiia «Nadiinist mashyn ta sporud»], Kyiv, 1995. (in Ukrainian)
13. Ye. T. Volodarskyi and L. O. Kosheva, *Statystychna obrobka danykh [Statistical data processing]*. Kyiv: NAU, 2007. (in Ukrainian)
14. I. V. Fedun, *Osnovy teorii nadiinosti ta kontroliu yakosti vyrobiv elektronnoi tekhniki [Fundamentals of reliability theory and quality control of electronic products]*. Vinnytsia: VDTU, 2003. (in Ukrainian)
15. V. V. Tryfoniuk, *Nadiinist prystroiv promyslovoi elektroniky [Reliability of industrial electronics devices]*. Kyiv: Lybid, 1993. (in Ukrainian)
16. M. S. Islam, S. Mir, T. Sebastian, and S. Underwood, "Design considerations of sinusoidally excited permanent-magnet machines for low-torque-ripple applications", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 41, no. 4, pp. 955–962, Jul. 2005, doi: <https://doi.org/10.1109/tia.2005.851026>
17. I. Kamwa, P. Viarouge, and J. Dickinson, "Direct estimation of the generalised equivalent circuits of synchronous machines from short-circuit oscillographs", *IEEE Proceedings C Generation, Transmission and Distribution*, vol. 137, no. 6, pp. 445–452, 1990, doi: <https://doi.org/10.1049/ip-c.1990.0060>
18. H. Sugimoto and S. Tamai, "Secondary resistance identification of an induction motor applied model reference adaptive system and its characteristics", in *1985 Annual Meeting Industry Applications Society*, Toronto, ON, Canada, Oct. 6–11, 1985. IEEE, 1985, pp. 613–620.
19. M. S. Islam, R. Islam, and T. Sebastian, "Experimental verification of design techniques of permanent-magnet synchronous motors for low-torque-ripple applications", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 47, no. 1, pp. 88–95, Jan. 2011, doi: <https://doi.org/10.1109/tia.2010.2091612>
20. S. K. Panda, Jian-Xin Xu, and Weizhe Qian, "Review of torque ripple minimization in PM synchronous motor drives", in *Energy Society General Meeting*, Pittsburgh, PA, USA, Jul. 20–24, 2008. IEEE, 2008, doi: <https://doi.org/10.1109/pes.2008.4596931>
21. Shaotang Chen, C. Namuduri, and S. Mir, "Controller-induced parasitic torque ripples in a PM synchronous motor", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 38, no. 5, pp. 1273–1281, Sep. 2002, doi: <https://doi.org/10.1109/tia.2002.803000>
22. R. Islam, I. Husain, A. Fardoun, and K. McLaughlin, "Permanent-Magnet synchronous motor magnet designs with skewing for torque ripple and cogging torque reduction", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 45, no. 1, pp. 152–160, 2009, doi: <https://doi.org/10.1109/tia.2008.2009653>
23. V. Zinovkin, M. Antonov, and I. Krysan, "Research of non-stationary electromagnetic processes in synchronous electric drive", in *2017 International Conference on Modern Electrical and Energy Systems*

- (MEES), Kremenichuk, Ukraine, Nov. 15–17, 2017. IEEE, 2017, doi: <https://doi.org/10.1109/mees.2017.8248874>
24. V. Zinovkin, O. Blyzniakov, and J. Vasilieva, “Physical simulation of electromagnetic phenomena in transformer equipment under strongly varying loads”, in *2017 International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*, Kremenichuk, Ukraine, Nov. 15–17, 2017. IEEE, 2017, doi: <https://doi.org/10.1109/mees.2017.8248919>
 25. V. V. Zinovkin, “Veroyatnostnye parametry rezkoperemennykh nagruzok energoemkikh elektrotekhnologicheskikh kompleksov [Probabilistic parameters of rapidly changing loads of energy-intensive electrical engineering complexes]”, *Proceedings of the Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine*, no. 1(10), pp. 136–144, 2005. (in Russian)
 26. V. V. Zinovkin, M. L. Antonov, and Y. O. Krysan, “Influence of non-stationary electromagnetic processes on electromechanical parameters in a synchronous electric drive”, *Electrical Engineering and Power Engineering*, no. 2, pp. 6–17, Feb. 2018, doi: <https://doi.org/10.15588/1607-6761-2017-2-1> (in Russian)
 27. V. V. Zinovkin and A. P. Liutyi, “Analiz elektrotekhnologicheskikh osobennostei i puti povysheniia effektivnosti energoemkikh elektrotekhnologicheskikh kompleksov [Analysis of electrical engineering characteristics and ways to improve the efficiency of energy-intensive electrical engineering complexes]”, *Proceedings of the Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine*, pp. 85–91, 2001. (in Russian)
 28. V. V. Zinovkin, A. O. Tretiakov, V. O. Makovskyi, and R. V. Zinoviev, “Avtomatyzovana systema kontroliu potochnoho stanu elektrotekhnichnoho ustakuvannia spetsialnoho pryznachennia [Automated system for monitoring the current status of special-purpose electrical equipment]”, in *Shchorichna naukovo-praktychna konferentsiia vykladachiv, naukovtsiv, molodykh uchenykh, aspirantiv ta studentiv «Tyzhden nauky-2023» [Annual scientific and practical conference of teachers, scientists, young scientists, postgraduate students and students “Science Week-2023”]*, Zaporizhzhia, Ukraine, Apr. 24–28, 2023. Zaporizhzhia: Zaporizhzhia Polytech. Nat. Univ., 2023, pp. 204–205. (in Ukrainian)
 29. A. Tretiakov and O. Syvachuk, “Multilevel diagnostics and automation analysis of the current condition of the transformers for specific purpose”, in *Shchorichna naukovo-praktychna konferentsiia vykladachiv, naukovtsiv, molodykh uchenykh, aspirantiv ta studentiv «Tyzhden nauky-2023» [Annual scientific and practical conference of teachers, scientists, young scientists, postgraduate students and students “Science Week-2023”]*, Zaporizhzhia, Ukraine, Apr. 24–28, 2023. Zaporizhzhia: Zaporizhzhia Polytech. Nat. Univ., 2023, pp. 358–360.

Received (надійшла) 23.06.2025

УДК 621.314.228

ЗИНОВКІН ВОЛОДИМИР ВАСИЛЬОВИЧ ✉ – доктор технічних наук, професор, професор кафедри електроприводу та автоматизації промислових установок, Національний університет «Запорізька політехніка»; м. Запоріжжя, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-7667-0658>; e-mail: znvvv@ukr.net.

ТРЕТЬЯКОВ АНДРІЙ ОЛЕКСАНДРОВИЧ – аспірант кафедри електроприводу та автоматизації промислових установок, Національний університет «Запорізька політехніка»; м. Запоріжжя, Україна.

ДОСЛІДЖЕННЯ ФАЗОВИХ РЕАКТИВНИХ ОПОРІВ ТРАНСФОРМАТОРІВ СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ В ПРОЦЕСІ ДІАГНОСТИКИ СИСТЕМИ ЗБУДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ РОЗСІЮВАННЯ

Дослідження фазових реактивностей спеціалізованих трансформаторів було проведено для діагностики систем збудження електромагнітного розсіювання. Особлива увага приділяється оцінці технічного стану енергетичних трансформаторів, що живлять енергоємні технологічні комплекси, оскільки струм і напруга в них змінюються за складними періодичними законами, що призводить до асиметричних режимів та аварій. Для підвищення надійності трансформаторного обладнання виникла потреба у розробці спеціалізованих мікропроцесорних та програмних засобів для автоматизованого аналізу та запобігання відмовам. Аналіз аварійності показав, що найчастіше пошкоджуються системи збудження електромагнітного розсіювання. Запропоновано методику дослідження фазових опорів короткого замикання силових трансформаторів зі складними гальванічними з'єднаннями обмоток без розбирання бака. Мета дослідження – отримати достовірну інформацію про поточний технічний стан обмоток трансформатора на основі вимірювань зовнішніх параметрів. Наукова новизна полягає у встановленні аналітичних залежностей між міжфазними опорами короткого замикання та фазовими опорами. Розроблений алгоритм програми для автоматизованого аналізу стану обмоток був реалізований на “Turbo Pascal”. Експериментальні дослідження на трансформаторі ТРДН-63000/150/35 підтвердили точність методики та виявили деформацію обмотки низької напруги. Основними причинами пошкоджень обмоток є обуглювання та полімеризація міжвиткової ізоляції через надмірне електричне навантаження. Запропонований метод дозволяє визначати деформації без розбирання трансформаторів, що доцільно використовувати в багатопараметричних системах діагностики для запобігання аваріям. Необхідно продовжити дослідження для інтеграції цього підходу з іншими методами діагностики та автоматизації. Методика може бути використана для багатообмоткових трансформаторів зі схемою з'єднання обмоток «зірка-трикутник-трикутник».

Ключові слова: силовий трансформатор; фазова реактивність; діагностика; електромагнітне розсіювання; автоматизований аналіз; пошкодження обмоток.

IGOR KHOMENKO ✉ – Candidate of Technical Sciences (PhD), Docent, Professor of the Department of Electric Power Transmission, National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5141-5391>; e-mail: igor.v.khomenko@gmail.com.

VIKTOR ORLOV – Postgraduate Student of the Department of Electric Power Transmission, National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-9809-0466>; e-mail: viktor.orlov@iee.khpi.edu.ua.

MYKHAILO KARPUSHYN – Bachelor Student of the Department of Electric Power Transmission, National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”; Kharkiv, Ukraine; e-mail: mykhailo.karpushyn@iee.khpi.edu.ua.

SVIATOSLAV RIABININ – Doctor of Philosophy (PhD), Senior Research Fellow of the Department of Ceramics, Refractories, Glass and Enamels Technology, National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2972-8540>; e-mail: riabinin_svyatoslav@hotmail.com.

IMPROVING THE ACCURACY OF MEASUREMENT OF ELECTRICAL VALUES IN THE NETWORKS OF REGIONAL ENERGY COMPANIES

The article considers the issues of increasing the accuracy and reliability of measurements of electrical quantities in the field of electric power. The high-voltage measuring path consists of current, voltage transformers and measuring devices. It is proposed to use optical current and voltage transformers as measuring transformers. The advantages of using optical transformers and their basic principles of operation are discussed. The significant advantages of these devices are that they work with instantaneous values of currents and voltages. The issue of modernization of the measuring device of the energy consumption parameter indicator, which has been developed at the Department of Electric Power Transmission of National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute” since 2005, is considered. It is shown that the energy consumption parameter indicator is an intelligent system consisting of two subsystems: informational and measuring. The main requirements for the measuring part include the implementation of the functions of control and accounting of electricity in three-phase alternating current networks. In addition, the measuring module must provide indication of controlled parameters, support the functions of setting parameters, receiving information via the EIA-485 interface, and storing the received data. The informational part of the measuring device is implemented with support for the ITU-T G.984 standard (including FXS), while the interconnection between the Wide and Local Area Network interfaces must operate in both switch and router modes. The requirements for the technical performance of the energy consumption parameter indicator are presented. The measuring device is controlled in accordance with the standard Optical Network Units Management and Control Interface control protocol according to the ITU-T G.984 recommendation, taking into account the provisions of G.988. The power limitation unit must be built into the energy consumption parameter indicator. The requirements for reliable use of the measuring device are given.

Keywords: optical current transformer; optical voltage transformer; energy consumption parameter indicator; measuring subsystem; information subsystem; interface.

Introduction. Electric energy (EE) has quantitative and qualitative indicators. Qualitative indicators of electric energy ensure the reliability and efficiency of the work of EE consumers. Quantitative indicators - timely payment for consumed EE, which is one of the main factors of sustainable development of the electric power industry. Therefore, specialists pay great attention to the issue of accounting for EE consumption and its quality. Accounting for EE flows is carried out at all stages from production to EE consumption using various information systems (for example, Automated system of commercial accounting of electric power) and EE meters. The issue of reliable accounting for EE flows is of significant national economic and technological importance. Significant assistance in solving these issues is provided by the additional introduction of modern measuring devices for quantitative and qualitative EE indicators. For more than 20 years, the Department of Electric Power Transmission has been developing and implementing an Energy Consumption Parameters Indicator (ECPI, Fig. 1). The general measuring path consists of an ECPI and current transformers (CT) and voltage transformers (VT). The reliability of the obtained results depends on the accuracy (error) of these devices. The article considers an effective means of increasing the accuracy of this measuring path through the use of modern

optical technologies in the production of CT and VT, the use of modernized ICPE.

Literature review. Each state pays significant attention to the development of the electric power industry, which is reflected in the main program documents [1–3]. At the same time, serious attention is paid to the development of regulatory documentation in the electric power industry [4, 5]. One of the important and fundamental issues of the electric power industry is the accounting of EE, because it ensures financial stability and sustainable development of the electric power industry. At the state level, the accounting of EE flows is implemented using modern information systems [6]. This leads to a significant digitalization of technological processes and their implementation in the production of EE. As a result, digital substations appear [7, 8]. In addition, to increase the reliability of measuring energy consumption parameters, high-precision measuring devices and means of metrological support are being developed [9, 10]. Modern meters and devices for monitoring the main EE parameters are being introduced for the population and enterprises [11]. Structures and networks of Oblenergo are the last link between the power system of Ukraine and end consumers of EE. For Oblenergo specialists, the population and enterprises, the issue of reliable metering of electric energy is of fundamental importance [12, 13].

© I. Khomenko, V. Orlov, M. Karpushyn, S. Riabinin, 2025



This article is licensed under the terms of the **Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)**. **Conflict of interest:** The authors have declared no conflict of interest.



Figure 1 – Measurements using ECPI

For networks with a voltage class of 3–110 kV, measurements are carried out using current and voltage transformers and measuring instruments. The errors of measuring instruments are constantly decreasing, while the errors of electromagnetic CT and VT practically do not change and have sufficiently large values [14–16].

Purpose of the article. The article considers the possibility of significantly increasing the accuracy of measurements by introducing optical CT and VT, as well as a modernized ECPI [11]. Modernization of the measuring device consists in creating an intelligent electricity metering device with a built-in optical interface.

Presenting main material. About twenty years ago, leading foreign companies [17, 18] began serial production of fundamentally new high-voltage meters – optical current transformers (OCT) and optical voltage transformers (OVT). These devices are now widely used in high-tech countries of Europe and North America. Due to significant advantages over traditional electromagnetic transformers, interest in optical technologies is growing both in the electric power industry and in the technical industry. Such devices function especially effectively when operating high-voltage power lines [19].

The principle of operation of OCT and OVT is based on a change in the polarization state of the light flux under the influence of an electromagnetic field created by current or voltage. This physical effect has been studied in detail [20] and it determines the design features and advantages of optical transformers in comparison with electromagnetic analogues.

Modern OCT and OVT, as a rule, provide a digital format for representing measured quantities - instantaneous values of current and voltage directly at the metering point. This significantly simplifies analog conversions and increases the accuracy of measurements. All computing functions are performed by a computer system with appropriate software [20, 21]. Moreover, many models also have analog outputs, which ensures universal application,

especially in the conditions of the transitional state of the Ukrainian energy sector, where the need for compatibility with traditional measuring devices remains [22, 23]. Thus, in most cases, only two physical quantities are measured today - instantaneous values of current and voltage, while other energy parameters are calculated automatically by software. These include active and reactive power, energy, harmonics and other indicators of electricity quality. The speed of optical transformers is comparable to the computing capabilities of modern microprocessors, which allows for a significant reduction in measurement errors and the implementation of intelligent analysis functions [24, 25]. All this indicates a clear trend towards digitalization of measurement technologies in the energy sector. At the same time, it is worth preserving the technical heritage – support for analog tools, which are still relevant in many measurement systems.

The purpose of the development is to create an intelligent electricity metering device with a built-in optical interface. Such a technical solution is achieved by combining information and technological subsystems. In addition, it is planned to implement services for automated transmission of qualitative and quantitative indicators of consumed electricity from individual metering devices, informing consumers about the volume of electricity used, as well as services belonging to the Smart Home class.

The intelligent electricity metering device is intended for use in scientific research, as well as for technical and commercial accounting of electricity consumption. It can also be integrated into automated information and measuring systems of commercial accounting. Structurally, the device is divided into two functional parts. The measuring part performs the functions of electricity metering and supplies power to the information part. The information part, in turn, provides the exchange of service and external data via an optical, copper or wireless network. The information part is powered from the measuring part via an alternating current network (≈ 230 V), while the

electricity consumption by the information part itself must be taken into account by the measuring module.

To exchange information between the measuring and information parts, in particular to read data on electricity consumption, it is necessary to use the low-speed EIA-485 interface (RS-485 is a standard for the physical level of an asynchronous interface): a four-wire half-duplex line that includes two signal and two power conductors. Saving data on electricity consumption can also be implemented in the memory of the information part.

The data transmission interface must be galvanically isolated. External data output must be implemented through the information part using an optical interface.

The main requirements for the measuring part include the implementation of the functions of monitoring and accounting for electricity in three-phase alternating current networks with a voltage of up to 1000 V, a frequency of 50 Hz at one, two or three tariffs, in compliance with the requirements of interstate standards.

The measuring module must provide the functions of accounting for electric energy and indicating the monitored parameters. In addition, the module must support the functions of setting parameters, receiving information via the EIA-485 interface, as well as storing the received data. The information part of the device is implemented in a version with support for the ITU-T G.984 standard (including FXS), while the internetwork connection between the WAN and LAN interfaces must function in both switch and router modes.

At the same time, the technical performance of the device must meet the following requirements:

- the throughput of unicast traffic routing between WAN and LAN in router, PPPoE or bridge modes must be at least 800 Mbps;
- the processing speed of multicast traffic from WAN to LAN in the specified modes must be at least 128 Mbps (8 streams of 16 Mbps);
- the device must function stably with simultaneous operation of a torrent client in the local network (during testing, 1000 sessions and 200 connections per slot must be supported);

The device is managed in accordance with the standard OMCI management protocol according to the ITU-T G.984 recommendation, taking into account the provisions of G.988. Remote administration is possible via the Web interface (WEB GUI) or Telnet via the WAN port. In addition, the TR-069 protocol is supported.

An intelligent metering device with an optical interface must be controlled using:

- a password-protected web interface;
- the TR-069 protocol;
- OMCI (in versions with ITU-T G.984 implementation).

Passwords for accessing the Web interface and the Internet must be stored in encrypted form, inaccessible in configuration files or when viewing the source code of a web page.

The device must support obtaining IP addresses and static routes to operator resources via the IPoE interface

using the CWMP and DHCP protocols. The configuration must be saved after rebooting.

The device must support Wi-Fi wireless data transmission interfaces (standards 802.11b, 802.11g, 802.11n), as well as Z-Wave or ZigBee protocols (at a frequency of 2.4 GHz), implemented as part of the information module to enable the creation of wireless networks.

The device must have a built-in power limitation unit that controls the level of active or total load power in a single-phase or three-phase network. This functional unit is located in the measuring part of the device. The threshold value for disconnecting the load is set remotely from a higher control level via the information module. The power is turned off automatically when the set threshold of consumed power is exceeded with the possibility of setting the shutdown delay. The function of automatic re-switching or granting permission for manual switching on by the subscriber using a button in the measuring module with setting the intervals or number of such switching on during the day is also provided. In addition, an authorized employee of the energy supply organization must have the ability to remotely switch on/off the load via the information module in manual mode. In the load limitation mode, independent power supply of the information part is provided, with mandatory accounting of its energy consumption by the measuring module.

The reliability of the device must meet the following indicators:

- time between failures for the measuring part – at least 150,000 hours, for the information part – at least 90,000 hours;
- inter-verification interval of the measuring part – 15 years.

A comparative analysis of various modifications of the measuring device is given in Table 1.

Table 1 - Comparative analysis of measuring devices

Device parameters	ECPI-1 (2005)	ECPI-3 (2020)
Phase voltages, V	70–280	30–300
Linear voltages, V	70–560	30–600
Phase currents, A	10–800	1–900
Frequency, Hz	30–70	10–75
Power, kW	10–360	1–360
Summary current error, %	1.5–2.5	0.5
Error of power, %	2.5	0.5
Cost, UAH	2500	5000

Conclusions. The work proposes measures to increase the accuracy of measurements of electrical quantities in networks with a voltage of 3–110 kV. This concerns the replacement of electromagnetic current and voltage transformers with optical ones. From the point of view of measurement errors, OCT and OVT have significant advantages. The use of optical devices requires the modernization of the measuring device – ECPI. In the general case, this concerns the adaptation of the information and measuring subsystems to work in the conditions of the new measuring path. In addition, the issue of modernization of other ECPI blocks (control unit,

information display unit, etc.) is considered. Modernization of ECPI should not significantly affect its final cost. By the way, this issue should also be taken into account when choosing optical measuring devices. In conclusion, we would like to emphasize the following. Unfortunately, today not all regional energy companies of Ukraine are able to implement the considered measuring path. This is due to the need for systematic and simultaneous reconstruction of their electrical networks (for example, simultaneous operation of analog and digital devices in relay protection and automation systems is practically impossible). In addition, a significant number of our regional energy companies have a difficult material and financial situation. Taking into account the significant prospects and interest of both scientists and technological workers in the issues under consideration, the scientific and technical community continues to actively work on the issues under consideration.

References

1. Ukraine, Cabinet of Ministers of Ukraine. (2023, Apr. 21). *Decree of the Cabinet of Ministers of Ukraine no. 373-r, Pro skhvalennia Enerhetychnoi stratehii Ukrainy na period do 2050 roku [On approval of the Energy Strategy of Ukraine until 2050]*. [Online]. Available: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/373-2023-p#Text> (in Ukrainian)
2. Ukraine, Verkhovna Rada of Ukraine. (2016, Sep. 22). *Law of Ukraine no. 1540-VIII, Pro Natsionalnu komisiiu, shcho zdiisniue derzhavne rehuliuвання u sferakh enerhetyky ta komunalnykh posluh [About the National Commission for State Regulation in the Spheres of Energy and Public Utilities]*. [Online]. Available: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1540-19#Text> (in Ukrainian)
3. O. V. Kyrylenko, V. V. Pavlovsky, and I. V. Blinov, "Scientific and technical support for organizing the work of the IPS of Ukraine in synchronous mode with the Continental European Power System ENTSO-E", *Tekhnichna Elektrodynamika*, vol. 2022, no. 5, pp. 59–66, Aug. 2022, doi: <https://doi.org/10.15407/techned2022.05.059> (in Ukrainian)
4. *Voltage Characteristics of Electricity Supplied by Public Electricity Networks*, DSTU EN 50160:2023, State Enterprise "Ukrainian Scientific Research and Training Center for Standardization, Certification and Quality Problems" (SE "UkrNDNC"), 2023.
5. A. Zharkin and S. Palachov, "Implementation of the European principles of measuring the quality of electric energy into the regulatory base of Ukraine", *Proceedings of the Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine*, no. 65, pp. 15–20, Aug. 2023, doi: <https://doi.org/10.15407/publishing2023.65.015> (in Ukrainian)
6. A. V. Prakhovnyk, "Kontseptualni polozhennia pobudovy ASKOE v umovakh zaprovadzhennia perspektyvnykh modelei enerhorynku Ukrainy [Conceptual provisions for the development of an ACEMS in the context of the introduction of promising energy market models in Ukraine]", *Enerhetyka ta elektryfikatsiia [Energy and electrification]*, no. 2, pp. 45–50, 2009. (in Ukrainian)
7. O. V. Kyrylenko, S. P. Denysiuk, and I. V. Blinov, "Digital transformation of the energy industry: Current trends and task", *Proceedings of the Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine*, no. 65, pp. 5–14, Aug. 2023, doi: <https://doi.org/10.15407/publishing2023.65.005> (in Ukrainian)
8. Siemens, "Digital Substation. Connecting to the digital world with the future built in", Siemens Industry Inc., 2019. [Online]. Available: <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:6d8d8d9b-d5db-4540-9b5f-6fd6e9ecfac/di-pa-ci-digital-substation-ipdf-en.pdf>
9. *Electric Energy. Electromagnetic Compatibility of Technical Equipment. Power Quality Limits in Public Electrical Systems*, GOST 13109-97, Technical Committee for Standardisation in the Field of Electromagnetic Compatibility of Technical Means (TC 30). (in Russian)
10. P. Nyezshmakov, O. Vasylieva, Y. Pavlenko, and V. Ogar, "Digital instrument construction – "new" metrology", *Ukrainian Metrological Journal*, no. 3, pp. 3–8, Oct. 2023, doi: <https://doi.org/10.24027/2306-7039.3.2023.291854> (in Ukrainian)
11. I. V. Khomenko, "Development and implementation indicator power consumption in the electrical distribution network", *Bulleten of NTU "KPI" Series "Problems of Electrical Machines and Apparatus Perfection. The Theory and Practice"*, no. 42 (1151), pp. 67–70, Dec. 2015. (in Ukrainian)
12. *Electromagnetic Compatibility (EMC) - Part 4-7: Testing and Measurement Techniques - General Guide on Harmonics and Interharmonics Measurements and Instrumentation, for Power Supply Systems and Equipment Connected Thereto*, DSTU IEC 61000-4-7:2024.
13. O. I. Hanus and K. O. Starkov, "Povrezhdaemost transformatorov napriazheniia v oblastnykh elektricheskikh setiakh AK «Kharkovoblenergo» i meropriiatiia po ee snizheniiu [Damage to voltage transformers in the regional electrical networks of the JSC "Kharkivoblenergo" and measures to reduce it]", *Lighting Engineering & Power Engineering*, no. 1, pp. 75–81, 2003. (in Russian)
14. Yu. I. Tugai and I. Yu. Tugai, "A combined method for study of ferroresonance processes in voltage transformer", in *2014 IEEE International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*, Kyiv, Ukraine, Jun. 2–6, 2014. IEEE, 2014, pp. 71–73, doi: <https://doi.org/10.1109/ieps.2014.6874205>
15. O. L. Karasinskiy and Y. F. Tesyk, "Correction of errors in instruments for measuring electric power parameters", *Tekhnichna Elektrodynamika*, no. 2, pp. 84–90, Feb. 2021, doi: <https://doi.org/10.15407/techned2021.02.084> (in Ukrainian)
16. Y. I. Tugai, O. I. Ganus, and K. O. Starkov, "The switching in voltage transformer", *Tekhnichna Elektrodynamika*, no. 5, pp. 73–75, Sep. 2016, doi: <https://doi.org/10.15407/techned2016.05.073> (in Ukrainian)
17. "Combined current and voltage transformers from 110 to 330 kV type VAU Supply, sale in Ukraine, Russia, Belarus, Kazakhstan, Georgia." "Autoformula Center" LLC. [Online]. Available: <https://afc.net.ua/en/kombinirovannye-transformatory-toka-i-napryazheniya/>
18. M. N. Gonçalves and M. M. Werneck, "Optical voltage transformer based on FBG-PZT for power quality measurement", *Sensors*, vol. 21, no. 8, Apr. 2021, Art. no. 2699, doi: <https://doi.org/10.3390/s21082699>
19. A. Loboda, "Optical measurement system under current power line high voltage", *Scientific Bulletin of the Tavria State Agrotechnological University*, vol. 8, no. 2, 2018, Art. no. 32, doi: <https://doi.org/10.31388/2220-8674-2018-2-31> (in Ukrainian)
20. A. A. Sokolovskii, "Optoelectronic measuring systems for high-voltage installations based on photovoltaic converters", *Measurement Techniques*, vol. 62, no. 8, pp. 702–707, Nov. 2019, doi: <https://doi.org/10.1007/s11018-019-01682-2>
21. Z.-h. Li and S. Zhao, "High accuracy optical voltage transformer with digital output based on coaxial capacitor voltage divider", *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, vol. 40, no. 13, pp. 3824–3833, Oct. 2017, doi: <https://doi.org/10.1177/0142331217732828>
22. Y.-X. Chen, J. Sun, and B.-Q. Meng, *Recent Development of Optical Electric Current Transformer and Its Obstacles*. To be published. doi: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2412.06282>
23. L. P. C. d. Silva, J. C. Santos, A. L. Côrtes, and K. Hidaka, "Optical high voltage measurement transformer using white light interferometry", in *XXV Encontro Nacional de Física da Matéria Condensada*, Caxambu, MG, Brazil, May 7–11, 2002, pp. 204–207. [Online]. Available: https://sec.sbfisica.org.br/procs/2002/res_pdf/res66.pdf
24. G. Ma et al., "Optical sensors for power transformer monitoring: A review", *High Voltage*, vol. 6, no. 3, pp. 367–386, Oct. 2020, doi: <https://doi.org/10.1049/hve2.12021>
25. E. So, R. Arseneau, D. Bennett, T. L. Nelson, and B. C. Waltrip, "NRC-NIST intercomparison of calibration systems for current transducers with a voltage output at power frequencies", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 52, no. 2, pp. 424–428, Apr. 2003, doi: <https://doi.org/10.1109/tim.2003.809909>

Received (надійшла) 22.06.2025

УДК 621.31

ХОМЕНКО ІГОР ВАСИЛЬОВИЧ ✉ – кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри передачі електричної енергії, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5141-5391>; e-mail: igor.v.khomenko@gmail.com.

ОРЛОВ ВІКТОР СЕРГІЙОВИЧ – аспірант кафедри передачі електричної енергії, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-9809-0466>; e-mail: viktor.orlov@ieee.khpi.edu.ua.

КАРПУШИН МИХАЙЛО ВОЛОДИМИРОВИЧ – здобувач кафедри передачі електричної енергії, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; e-mail: mykhailo.karpushyn@ieee.khpi.edu.ua.

РЯБІНІН СВІТОСЛАВ ОЛЕКСАНДРОВИЧ – доктор філософії (PhD), старший науковий співробітник кафедри технологій кераміки, вогнетривів, скла та емалей, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2972-8540>; e-mail: riabinin_svyatoslav@hotmail.com.

ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ВІМІРІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ ВЕЛИЧИН У МЕРЕЖАХ ОБЛЕНЕРГО

У статті розглянуті питання підвищення точності та достовірності вимірів електричних величин в галузі електроенергетики. Високовольтний вимірювальний тракт складається з трансформаторів струму, напруги та вимірювальних приладів. Запропоновано, в якості вимірювальних трансформаторів використовувати оптичні трансформатори струму та напруги. Розглянуті переваги використання оптичних трансформаторів, та їх основні принципи функціонування. Суттєвими перевагами цих пристроїв є те що вони працюють з миттєвими значеннями струмів та напруг. Розглянуто питання модернізації вимірювального пристрою індикатора параметрів енергоспоживання, що розробляється на кафедрі передачі електричної енергії Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» з 2005 року. Показано, що індикатор параметрів енергоспоживання являє собою інтелектуальну систему, що складається з двох підсистем інформаційної та вимірювальної. Основні вимоги до вимірювальної частини передбачають реалізацію функцій контролю та обліку електроенергії у трифазних мережах змінного струму. Крім того, вимірювальний модуль повинен забезпечувати індикацію контрольованих параметрів, підтримувати функції задання параметрів, приймання інформації через інтерфейс EIA-485, а також зберігання отриманих даних. Інформаційна частина вимірювального приладу реалізується з підтримкою стандарту ITU-T G.984 (включаючи FXS), при цьому міжмережеве з'єднання між WAN та LAN інтерфейсами має функціонувати як у режимі комутатора, так і маршрутизатора. Представлено вимоги до технічної продуктивності індикатора параметрів енергоспоживання. Керування вимірювальним пристроєм здійснюється відповідно до стандартного протоколу управління OMCI згідно з рекомендацією ITU-T G.984, з урахуванням положень G.988. В індикатор параметрів енергоспоживання повинен бути вмонтований блок обмеження потужності. Приведено вимоги до надійного використання вимірювального пристрою.

Ключові слова: оптичний трансформатор струму; оптичний трансформатор напруги; індикатор параметрів енергоспоживання; вимірювальна підсистема; інформаційна підсистема; інтерфейс.

OLEKSANDR SHTOMPEL ✉ – Postgraduate Student of the Department of Electric Transport, O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-1757-2650>; e-mail: shtompel100@gmail.com.

STUDY OF QUASI-STATIONARY OPERATING MODES OF A TRACTION DRIVE BASED ON A SYNCHRONOUS-REACTIVE MOTOR WITH PERMANENT MAGNETS

The paper analyzes quasi-stationary processes in traction electric drives of subway cars using mathematical models of synchronous jet motors with permanent magnets. These models were adapted for modeling in MATLAB SIMULINK in accordance with general methodologies. This approach simplifies the modeling process by using proven mathematical representations of semiconductor components available as standard library blocks in the modeling environment. The development of a simulation model for determining the operating parameters of the traction drive of subway cars from a synchronous jet motor with sectioned and non-sectioned permanent magnets is considered, which allows determining the level of higher harmonics of the phase current of the motor, as well as the parameters that determine the operation of semiconductor keys in the inverter: current, average and maximum values of the current flowing through the insulated-gate bipolar transistor, as well as the maximum value of the voltage on the insulated-gate bipolar transistor in different operating modes. It is proposed to present the results in relative units for comparative analysis of the research results. The nominal value of the phase current was used as the base current, and the base voltage was the linear voltage of the traction motor stator. It was established that at a pulse-width modulation frequency of more than 1200 Hz, the amplitudes of higher harmonics, both in traction and braking modes, do not exceed 10 % of the effective value of the phase current for a motor with a sectioned rotor and 12 % for a motor with a non-sectioned rotor. The use of modern insulated-gate bipolar transistor transistors, which allow the implementation of pulse-width modulation at frequencies up to 1500 Hz, makes the impact of higher harmonics on the operation of the motor minimal, since their value can be compared with the accuracy of engineering calculations. However, when using low-frequency insulated-gate bipolar transistor transistors with a pulse-width modulation frequency of up to 1000 Hz, it is necessary to take into account the influence of higher harmonic currents. These patterns should be taken into account to optimize the operation of the traction drive of subway cars.

Keywords: subway cars; traction drive; synchronous-reactive motor with permanent magnets; higher harmonics of the motor phase current; IGBT transistor; influence of higher harmonics.

Introduction. Currently, global practice widely adopts traction electric drives with asynchronous motors for railway rolling stock, as well as for industrial and urban transport systems. In Ukraine, high-power asynchronous electric drives are implemented in both urban electric transport and mainline railways [1].

Traction asynchronous electric drives offer numerous advantages, including high energy efficiency, favorable weight and size parameters, reliability, structural simplicity, and extended service life. Nonetheless, the ongoing demand for reduced energy consumption and prolonged rolling stock lifespan presents new challenges for the scientific and engineering community – namely the need for further enhancement of asynchronous traction drives and exploration of alternative electric drive technologies [2]. One such alternative involves synchronous motors with permanent magnet excitation [3]. However, the substantial weight and high cost of high-coercivity magnets significantly increase the production cost of these motors. One of the promising directions in developing energy-efficient technologies for metro rolling stock is the implementation of traction drives utilizing synchronous traction motors. These motors offer high efficiency, particularly under partial load conditions, and ensure rapid acceleration and deceleration of trains [4].

To explore this further, we examine the fundamental principles behind developing the core component of a traction drive's mathematical model – the synchronous motor. Since the high energy performance of synchronous motors is largely attributed to their magnetic systems with complex flux distribution, the mathematical model must account for the geometric characteristics of both the rotor and the stator [5]. This model is constructed based on a

generalized mathematical representation. The basics of this mathematical model are given in [6].

Quasi-stationary processes in traction electric drives of metro cars are analyzed using mathematical models of synchronous reluctance motors with permanent magnets, as presented in [6]. These models have been adapted for simulation in MATLAB SIMULINK, following the general methodologies outlined in [7, 8, 9]. This approach streamlines the modeling process by utilizing validated mathematical representations of semiconductor components, which are available as standard library blocks within the simulation environment.

Purpose of the article. The developed simulation model was used to determine the operating parameters of the traction drive of subway cars from a synchronous jet motor with sectioned and non-sectioned permanent magnets to determine the influence of pulse-width modulation (PWM) frequencies on the characteristics of the inverter semiconductor devices and the level of higher harmonic currents of the motor.

Research results. The simulation model for modeling quasi-stationary modes of operation of a traction drive based on a synchronous jet motor with permanent magnets is presented in Fig. 1 and 2. The general structure of the simulation model is presented in Fig. 1.

It consists of the following main subsystems, MOTOR, AIN, SV_PWM. The MOTOR subsystem (Fig. 2) is designed to simulate a traction motor, the AIN subsystem simulates an autonomous three-phase autonomous voltage inverter based on insulated-gate bipolar transistor (IGBT) key models, SV_PWM is a control system for an autonomous voltage inverter that implements the law of space-vector pulse-width control [10] of the engine.

© O. Shtompel, 2025



This article is licensed under the terms of the *Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)*. **Conflict of interest:** The author has declared no conflict of interest.

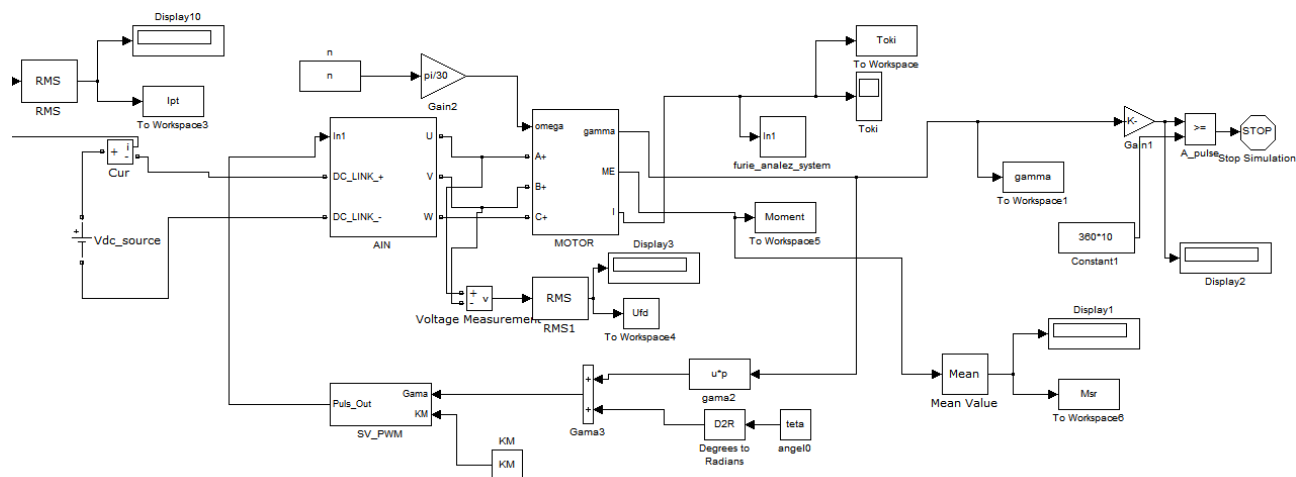


Figure 1 – Simulation model for modeling quasi-stationary modes of operation of a traction drive based on a synchronous jet motor with permanent magnets

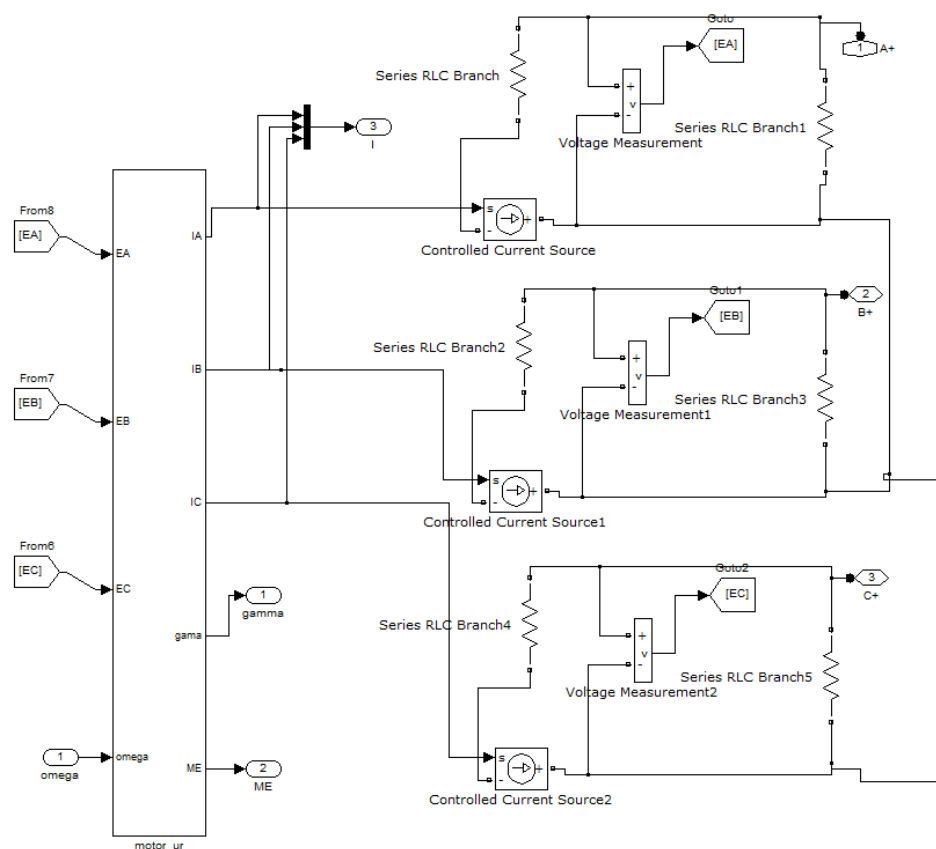


Figure 2 – MOTOR subsystem

The subsystem “furie_analez_system” is intended for spectral analysis of the stator phase current (determination of the maximum values of the harmonic components of the current $I_{f\ max\ 15}$, $I_{f\ max\ 17}$, $I_{f\ max\ 111}$, $I_{f\ max\ 113}$) and determination of the effective value.

The subsystem “MOTOR” (Fig. 2) provides a simulation model of a synchronous-reactive motor with permanent magnets. This model includes the subsystem “motor_ur”, where the mathematical model of the motor is implemented, as well as the blocks “Controlled Current Source”, “Controlled Current Source1” and “Controlled Current Source2”, which provide the ability to coordinate

the blocks of s-models and sps-models by including controlled current sources. The voltmeter blocks “Voltage Measurement”, “Voltage Measurement3” and “Voltage Measurement5” are used to monitor the phase voltage. The subsystem “motor_ur” contains the blocks “Interpreted MATLAB Function”, “Interpreted MATLAB Function1” and “Interpreted MATLAB Function2”, which implement the right-hand sides of the differential equations describing the derivatives of the stator currents according to the mathematical model [10]. The blocks “Interpreted MATLAB Function3” are intended for calculating the level of the electromagnetic torque of the motor.

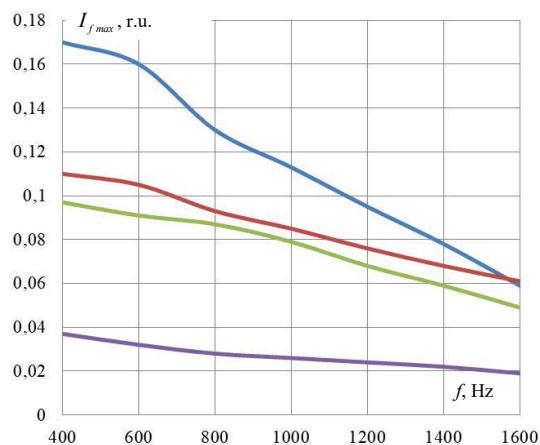


Figure 4 – Dependence of the amplitudes of phase harmonic currents on the PWM frequency of a synchronous jet motor with sectioned permanent magnets in traction mode:
blue line – $I_{f\max15ru}$; red line – $I_{f\max17ru}$; green line – $I_{f\max111ru}$; purple line – $I_{f\max113ru}$

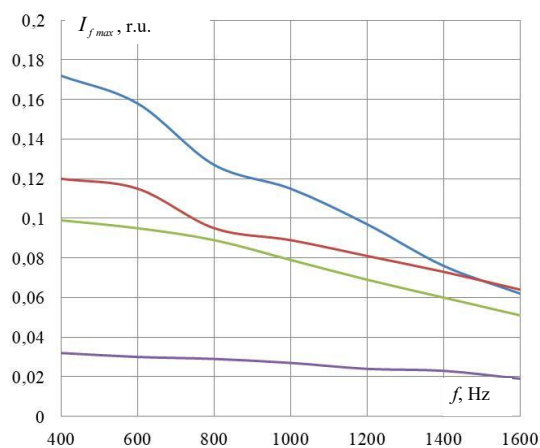


Figure 5 – Dependence of the amplitudes of phase harmonic currents on the PWM frequency of a synchronous reactive motor with sectioned permanent magnets in braking mode:
blue line – $I_{f\max15ru}$; red line – $I_{f\max17ru}$; green line – $I_{f\max111ru}$; purple line – $I_{f\max113ru}$

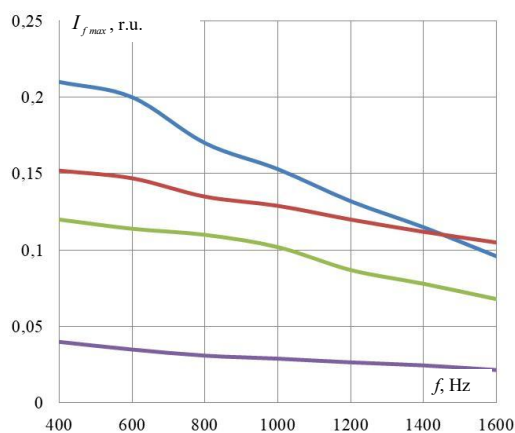


Figure 6 – Dependence of the amplitudes of phase harmonic currents on the PWM frequency of a synchronous jet motor with non-sectioned permanent magnets in traction mode:
blue line – $I_{f\max15ru}$; red line – $I_{f\max17ru}$; green line – $I_{f\max111ru}$; purple line – $I_{f\max113ru}$

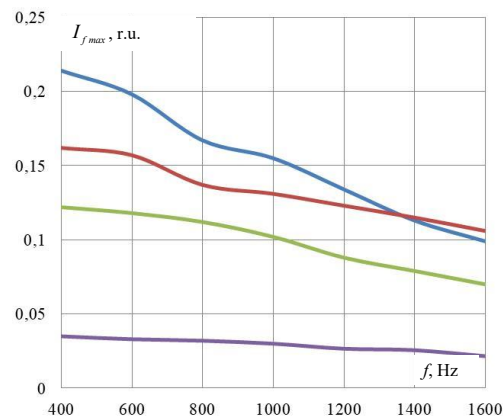


Figure 7 – Dependence of the amplitudes of phase harmonic currents on the PWM frequency of a synchronous jet motor with non-sectioned permanent magnets in braking mode:
blue line – $I_{f\max15ru}$; red line – $I_{f\max17ru}$; green line – $I_{f\max111ru}$; purple line – $I_{f\max113ru}$

When using modern IGBT transistors, which allow PWM at frequencies up to 1200 Hz, the influence of higher harmonics on the operation of a synchronous reactive motor with permanent magnets is insignificant, as the magnitudes of the higher harmonic currents can be compared with the accuracy of engineering calculations. However, when using low-frequency IGBT transistors with a PWM frequency of up to 1000 Hz, it is necessary to take into account the higher harmonic currents.

Further studies of the influence of the operating modes of the traction drive were carried out for an engine with sectioned permanent magnets, as a more promising design. Fig. 8–11 at a frequency of 1400 Hz presents the dependences of the relative values of the amplitudes of the higher harmonic currents 5, 7, 11 and 13 harmonics of phase currents. The dependences have a sharply variable nature.

When analyzing the graphs, two components of the harmonic amplitude changes depending on the rotation frequency are traced: the first harmonic amplitudes increase with increasing rotation frequency, the second is periodic, which lies in the range from 0.3...0.5 r.u.

The amplitude of harmonics also increases. This is due to the decrease in the number of PWM pulses per period of the 1st harmonic of the current and the discreteness of their change. The amplitudes of harmonics are in the range from 0.01 to 0.05 r.u.

The maximum influence of the 11th harmonic is at a rotation frequency of 1.25 rpm and a modulation factor of 1.

The effective value of the current flowing through the IGBT transistor (Fig. 12 and 13) lies in the range from 0.7 to 0.9 of the phase current of the traction motor.

Larger values correspond to higher rotational speeds and lower modulation coefficient values.

The average value of currents in the traction mode lies in the range from 0.1 to 0.55 of the phase current, and in the braking mode from –0.1 to –0.42. The dependence is close to “smooth”. The maximum value in the traction mode is reached at the nominal speed and the modulation factor is equal to 1, the minimum in the braking mode at the same values.

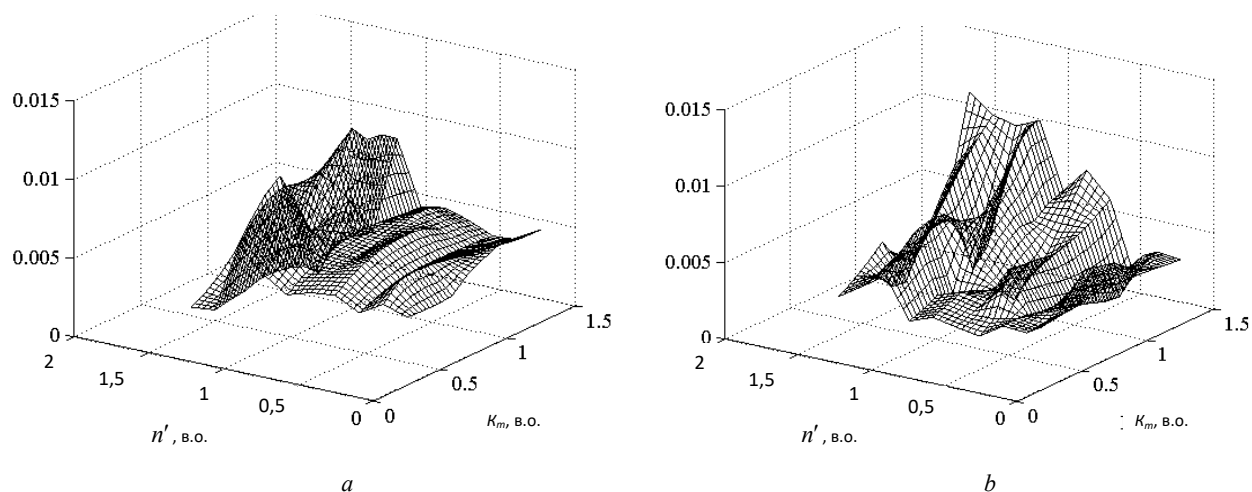


Figure 8 – Dependence of the relative value of the 5th harmonic phase current of a synchronous jet motor sectioned permanent magnets ($I_{fmax15ru}$): *a*) in traction mode; *b*) in braking mode

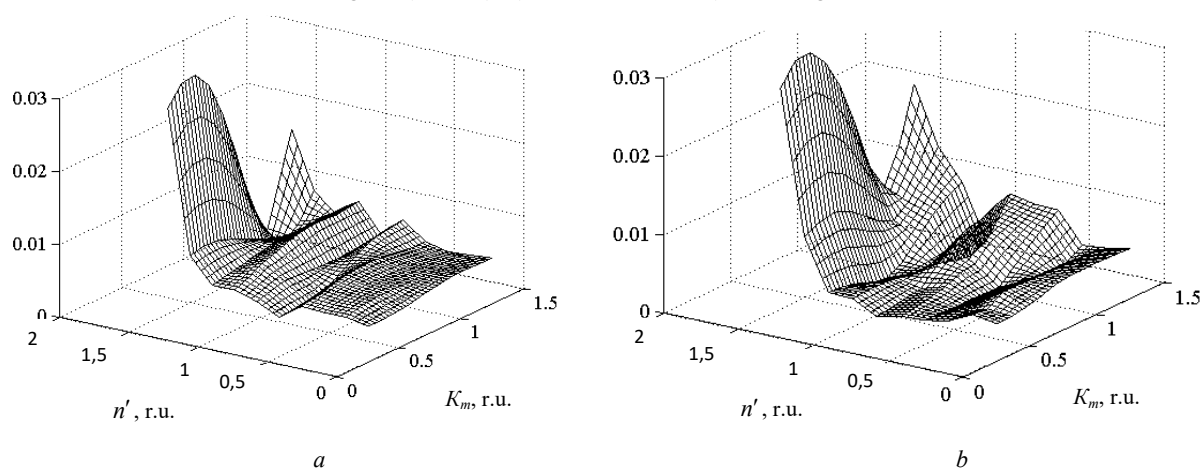


Figure 9 – Dependence of the relative value of the 7th harmonic phase current of a synchronous jet motor sectioned permanent magnets ($I_{fmax17ru}$): *a*) in traction mode; *b*) in braking mode

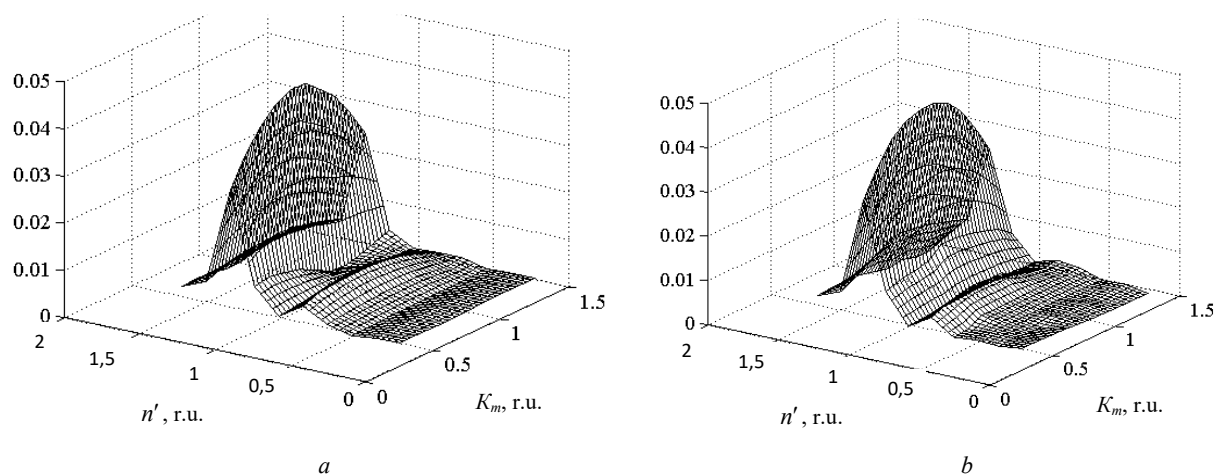


Figure 10 – Dependence of the relative value of the 11th harmonic of the phase current of a synchronous jet motor sectioned permanent magnet ($I_{fmax111ru}$): *a*) in traction mode; *b*) in braking mode

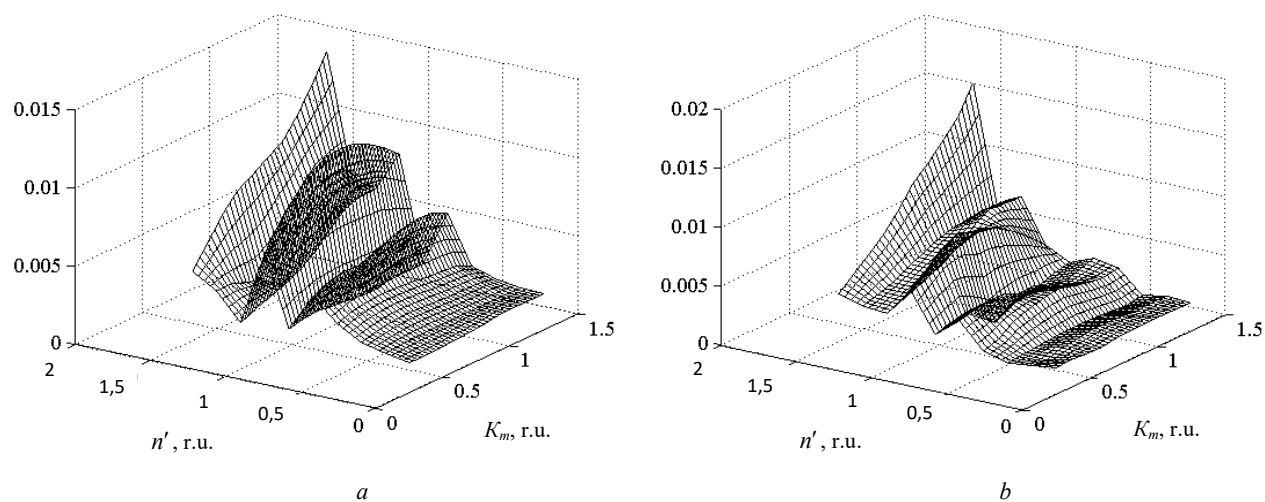


Figure 11 – Dependence of the relative value of the 13th harmonic phase current of a synchronous jet motor sectioned permanent magnets ($I_{\max 13ru}$): a) in traction mode; b) in braking mode

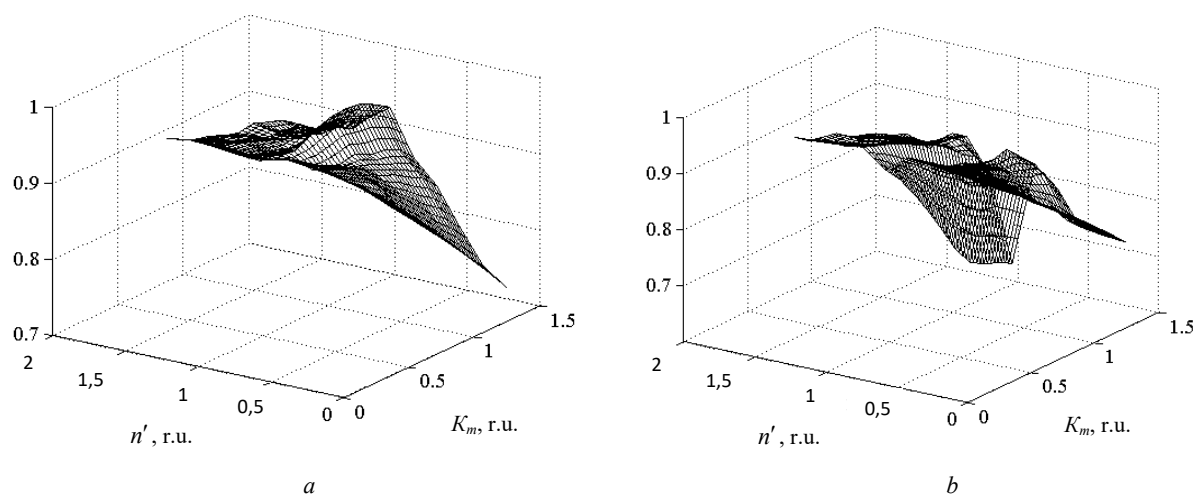


Figure 12 – Dependence of the relative value of the current flowing through the IGBT transistor (I_{CRMSoe}): a) in traction mod; b) in braking mode

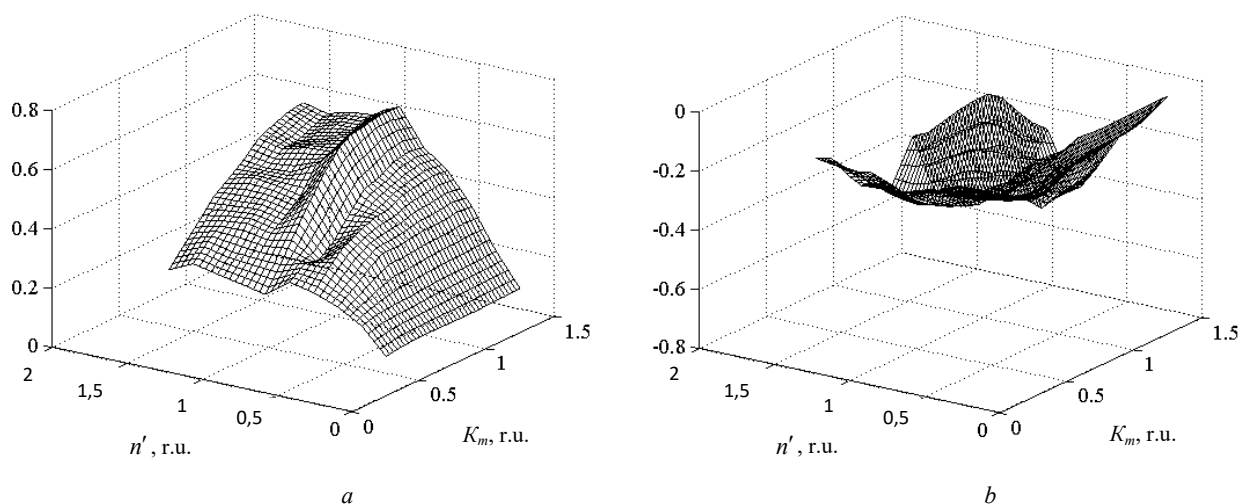


Figure 13 – Dependence of the relative average value of the current flowing through the IGBT transistor (I_{CAVoe}): a) in traction mode; b) in braking mode

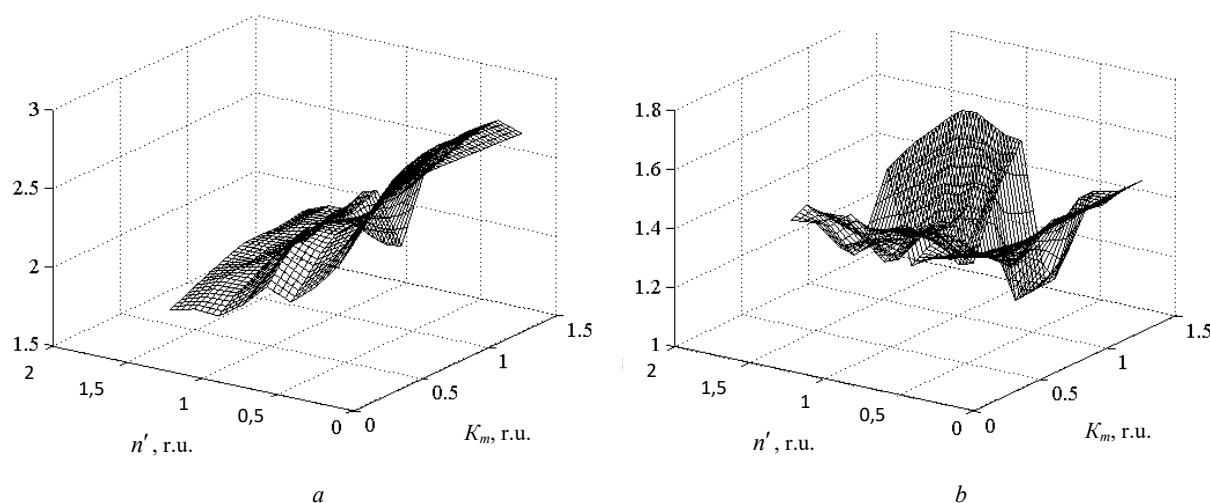


Figure 14 – Dependence of the relative maximum value of the current flowing through the IGBT transistor ($I_{max VT0e}$):
a) in traction mode; b) in braking mode

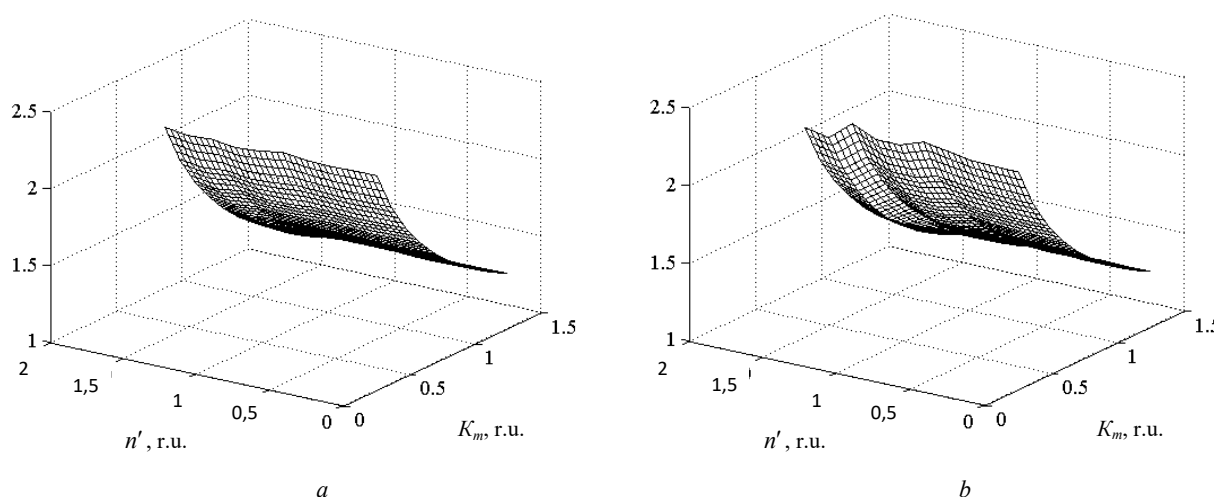


Figure 15 – Dependence of the relative maximum value of the voltage applied to the IGBT transistor. ($U_{max VT0e}$):
a) in traction mode; b) in braking mode

The maximum value of the currents flowing through the IGBT transistor is in the range from 1.6 to 2.7 of the phase current of the synchronous jet motor permanent magnets, for traction mode and from 1.2 to 1.56 in braking mode. The maximum voltage applied to the transistor (Fig. 14 and 15) does not exceed twice the line voltage on the motor.

Conclusions. For the first time, a simulation model has been developed to determine the operating parameters of the traction drive of subway cars from a synchronous jet motor with sectioned and non-sectioned permanent magnets. The model allows you to determine the level of higher harmonics of the motor phase current, as well as the parameters that determine the operation of semiconductor switches in the inverter: current, average and maximum current values flowing through the IGBT transistor, as well as the maximum voltage value on the IGBT in different operating modes.

It was determined that at a PWM frequency of more than 1200 Hz, the amplitudes of higher harmonics, both in traction and braking modes, do not exceed 10 % of the effective value of the phase current for a motor with a

sectioned rotor and 12 % for a motor with a non-sectioned rotor. The use of modern IGBT transistors, which allow implementing PWM at frequencies up to 1500 Hz, makes the impact of higher harmonics on the operation of the motor minimal, since their values can be compared with the accuracy of engineering calculations. However, when using low-frequency IGBT transistors with a PWM frequency of up to 1000 Hz, it is necessary to take into account the impact of higher harmonic currents. These patterns should be taken into account to optimize the operation of the traction drive of metro cars.

References

1. M. V. Hovorost, L. V. Smenova, I. O. Sinchuk, I. V. Kasatkina, and M. L. Baranovska, "Identification and diagnostics of electric parameters of traction asynchronous electric motors of mine electric locomotives", *Electrification of Transport*, no. 14, pp. 61–70, 2017. (in Russian)
2. O. M. Petrenko, V. V. Bozhko, and M. V. Khvorost, "Identification of thermal conductivity between external air and the case of the equivalent heat scheme of substitution of the asynchronous traction engine of a traw wagon", *Electrification of Transport*, no. 13, pp. 59–63, 2017. (in Ukrainian)

3. B. G. Liubarskyi, L. V. Overianova, I. S. Riabov, D. I. Iakunin, O. O. Ostroverkh, and Y. V. Voronin, "Estimation of the main dimensions of the traction permanent magnet-assisted synchronous reluctance motor", *Electrical Engineering & Electromechanics*, no. 2, pp. 3–8, Apr. 2021, doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272x.2021.2.01>
4. B. G. Liubarskyi, "The theoretical basis for the selection and evaluation of advanced systems of electromechanical energy conversion of electric rolling stock", dissertation of Doctor of Technical Sciences, Nat. Tech. Univ. "Kharkiv Polytech. Inst.," Kharkiv, 2014. (in Ukrainian)
5. O. V. Demydov, "Energy efficient permanent magnet synchronous motor direct drive traction system for commuter train", dissertation of Candidate of Technical Sciences, Nat. Tech. Univ. "Kharkiv Polytech. Inst.," Kharkiv, 2021. (in Ukrainian)
6. B. Liubarskyi, A. Demydov, B. Yeritsyan, R. Nuriev, and D. Iakunin, "Determining electrical losses of the traction drive of electric train based on a synchronous motor with excitation from permanent magnets", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 2, no. 9 (92), pp. 29–39, Apr. 2018; doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.127936>
7. N. Förster, A. Gerlach, R. Leidhold, S. Buryakovskiy, A. Masliy, and B. G. Lyubarskiy, "Design of a linear actuator for railway turnouts", in *IECON 2018 - 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Washington, DC, Oct. 21–23, 2018. IEEE, 2018, pp. 463–470, doi: <https://doi.org/10.1109/iecon.2018.8591471>
8. B. Uspensky, K. Avramov, B. Liubarskyi, Y. Andrieiev, and O. Nikonov, "Nonlinear torsional vibrations of electromechanical coupling of diesel engine gear system and electric generator", *Journal of Sound and Vibration*, vol. 460, Nov. 2019, Art. no. 114877, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2019.114877>
9. B. Liubarskyi, D. Iakunin, O. Nikonov, D. Liubarskyi, and B. Yeritsyan, "Optimizing geometric parameters for the rotor of a traction synchronous reluctance motor assisted by partitioned permanent magnets", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 2, no. 8 (116), pp. 38–44, Apr. 2022, doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.254373>
10. O. M. Shtompel, "General approaches to creating a mathematical model of a synchronous reactive motor with permanent magnets for electric transport", *Energy Saving. Power Engineering. Energy Audit*, no. 2(205), pp. 15–29, 2025, doi: <https://doi.org/10.20998/2313-8890.2025.02.02>

Надійшла (received) 28.05.2025

УДК 629.429.3:621.313

ШТОМПЕЛЬ ОЛЕКСАНДР МИКОЛАЙОВИЧ ✉ – аспірант кафедри електричного транспорту, Харківський національний технічний університет міського господарства імені О. М. Бекетова; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-1757-2650>; e-mail: shtompel100@gmail.com.

ДОСЛІДЖЕННЯ КВАЗИСТАЦІОНАРНИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ ТЯГОВОГО ПРИВОДУ НА ОСНОВІ СИНХРОННО-РЕАКТИВНОГО ДВИГУНА З ПОСТІЙНИМИ МАГНІТАМИ

У роботі аналізуються квазістаціонарні процеси в тягових електроприводах вагонів метрополітену з використанням математичних моделей синхронних реактивних двигунів з постійними магнітами. Ці моделі були адаптовані для моделювання в MATLAB SIMULINK відповідно до загальних методологій. Такий підхід спрощує процес моделювання за рахунок використання перевірених математичних уявлень напівпровідникових компонентів, доступних у вигляді стандартних бібліотечних блоків у середовищі моделювання. Розглядається розробка імітаційної моделі для визначення робочих параметрів тягового приводу вагонів метрополітену від синхронно-реактивного двигуна з секціонованими та несекціонованими постійними магнітами, яка дозволяє визначити рівень вищих гармонік фазного струму двигуна, а також параметри, що визначають роботу напівпровідникових ключів в інверторі: струм, середнє та максимальне значення струму, що протікає через IGBT-транзистор, а також максимальне значення напруги на IGBT у різних режимах роботи. Запропоновано для проведення порівняльного аналізу результатів дослідження представити результати у відносних одиницях. У якості базового струму використано номінальне значення фазного струму, а базова напруга – лінійна напруга статора тягового двигуна. Встановлено, що при частоті широтно-імпульсної модуляції понад 1200 Гц амплітуди вищих гармонік, як у тяговому, так і в гальмівному режимах, не перевищують 10 % від ефективного значення фазного струму для двигуна з секціонованим ротором та 12 % для двигуна з несекціонованим ротором. Використання сучасних IGBT-транзисторів, які дозволяють реалізувати широтно-імпульсну модуляцію на частотах до 1500 Гц, робить вплив вищих гармонік на роботу двигуна мінімальним, оскільки їх значення можна порівняти з точністю інженерних розрахунків. Однак, при використанні низькочастотних IGBT транзисторів з частотою широтно-імпульсної модуляції до 1000 Гц необхідно враховувати вплив струмів вищих гармонік. Ці закономірності слід враховувати для оптимізації роботи тягового приводу вагонів метрополітену.

Ключові слова: вагони метрополітену; тяговий привід; синхронно-реактивний двигун з постійними магнітами; вищі гармоніки фазного струму двигуна; IGBT-транзистор; вплив вищих гармонік.

БРОВКО КОСТЯНТИН ЮРІЙОВИЧ ✉ – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електротехніки та електроенергетики, Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9669-9316>; e-mail: brovkokonstantin@gmail.com.

ВИНОКУРОВА НАТАЛІЯ ДМИТРІВНА – асистент кафедри електротехніки та електроенергетики, Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-6210-838X>; e-mail: v.natasha.d@gmail.com.

ВЕЛИКОГОРСЬКИЙ ОЛЕГ ВОЛОДИМИРОВИЧ – аспірант кафедри електротехніки та електроенергетики, Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-6102-0659>; e-mail: velikogorskijoleg@gmail.com.

КОМП'ЮТЕРНА СИМУЛЯЦІЯ РОЗВИТКУ АВАРІЇ НА ЧОРНОБИЛЬСЬКІЙ АЕС ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ІНТЕРАКТИВНОГО ТРЕНАЖЕРА-СИМУЛЯТОРА

Розглянуто процес створення математичної моделі та інтерактивного комп'ютерного тренажера-симулятора, призначених для відтворення динаміки розвитку аварії на Чорнобильській атомній електричній станції. Основною метою дослідження є ідентифікація ключових фізичних факторів, які призвели до катастрофічного розгону реактора, з подальшим використанням результатів моделювання у навчальних і дослідницьких цілях. У рамках роботи було реалізовано комплексну інтегровану модель, яка охоплює нейтронну кінетику з урахуванням запізнілих нейтронів, змін реактивності через паровий ефект та переміщення регулюючих стрижнів, баланс концентрації ксенону-135, а також теплогідравлічні характеристики активної зони. Симуляція реалізована за допомогою чисельних методів інтегрування з адаптивним часовим кроком, що дозволило відтворити деталі аварійного процесу з високою точністю. Візуалізація динаміки параметрів, таких як потужність, температура, тиск і положення стрижнів, виконана за допомогою веб-бібліотеки з частотою оновлення 60 кадрів за секунду. Верифікація моделі показала відповідність результатів історичним даним із точністю понад 93 % для основних параметрів, включаючи момент досягнення пікової потужності та значення температури й тиску. Порівняльний аналіз із наявними літературними джерелами засвідчив, що запропонований підхід має переваги над класичними одномірними моделями, які не враховують комбіновану дію кількох фізичних факторів. Практична цінність розробки полягає у створенні ефективного навчального інструменту для підготовки оперативного персоналу атомної електричної станції, що дозволяє аналізувати критичні сценарії, виявляти ефективні точки втручання та вивчати наслідки помилкових дій. Обмеженням моделі є відсутність просторового розподілу параметрів у реакторі та спрощення термогідравлічних залежностей, що планується врахувати в подальших дослідженнях.

Ключові слова: Чорнобильська аварія; математичне моделювання; комп'ютерний тренажер; реактивність; ксенонове отруєння; тепломасообмін; нейтронна кінетика; симуляція; ядерна безпека.

Вступ. Чорнобильська катастрофа 1986 року залишається однією з найбільш знакових техногенних аварій в історії людства, яка кардинально змінила підходи до ядерної безпеки та експлуатації атомних електростанцій (АЕС). Ця подія не лише виявила серйозні недоліки в конструкції реакторів типу РВПК-1000, але й наочно продемонструвала, наскільки критичним може бути людський фактор у керуванні складними технологічними системами. Сьогодні, коли світова спільнота знову звертається до атомної енергетики як до одного з інструментів боротьби з кліматичними змінами, уроки Чорнобиля набувають особливої актуальності. У цьому контексті комп'ютерне моделювання аварійних ситуацій стає незамінним інструментом як для підготовки оперативного персоналу АЕС, так і для глибшого наукового аналізу механізмів розвитку аварій.

Розроблений тренажер-симулятор аварії на Чорнобильській АЕС (ЧАЕС) поєднує в собі точні математичні моделі фізичних процесів, що відбувалися в реакторі, з сучасними можливостями візуалізації та інтерактивного керування. Він ґрунтується на фундаментальних принципах ядерної фізики, теплофізики та кінетики хімічних реакцій, інтегрованих у єдину динамічну систему. Особливу цінність цього інструменту становить те, що він

дозволяє не лише відтворити хід реальної аварії з високою точністю, але й досліджувати альтернативні сценарії розвитку подій, що особливо важливо для розробки нових систем безпеки.

Математична основа моделі включає систему взаємопов'язаних диференціальних рівнянь, що описують зміну потужності реактора, кінетику нейтронів, динаміку ксенонowego отруєння, тепломасообмін у активній зоні та поведінку робочого тіла в контурі охолодження. Важливим аспектом є врахування нелінійних ефектів, таких як позитивний паровий коефіцієнт реактивності, який відіграв вирішальну роль у розвитку Чорнобильської аварії. Сучасні обчислювальні технології дозволили реалізувати ці складні моделі у формі, доступній для широкого кола користувачів, з можливістю візуального аналізу в режимі реального часу. Це відкриває нові можливості для використання тренажера як у навчальних цілях для підготовки фахівців атомної галузі, так і в наукових дослідженнях, спрямованих на вдосконалення систем безпеки ядерних реакторів. Розуміння глибинних причин Чорнобильської катастрофи через такі інструменти моделювання є ключовим для запобігання подібним аваріям у майбутньому та забезпечення сталого розвитку атомної енергетики.

© К. Ю. Бровко, Н. Д. Винокурова, О. В. Великогорський, 2025



Ця робота ліцензується відповідно до **Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)**
Конфлікт інтересів: Автори заявили про відсутність конфлікту

Аналіз літературних джерел та постановка проблеми. У роботі [1] відзначено значний прогрес у динамічному моделюванні та управлінні ядерними установками, зокрема впровадження гібридних моделей, що поєднують фізичні закономірності та дані експлуатації. Проте, ці дослідження переважно зосереджені на малих модульних реакторах (SMR) і не охоплюють специфіку реакторів типу РВПК-1000, таких як ті, що використовувалися на ЧАЕС.

У статті [2] описано програмний комплекс для тривимірної візуалізації нейтронного поля в реакторі РВПК-1000. Хоча це дослідження сприяє кращому розумінню просторового розподілу нейтронного потоку, воно не включає моделювання динаміки аварійних процесів, таких як ксенонове отруєння чи тепломасообмін.

У дослідженні [3] представлено симулятор РВПК-реактора для підготовки операторів. Однак, цей інструмент орієнтований на відтворення штатних операційних сценаріїв і не моделює складні аварійні ситуації, подібні до тих, що сталися на ЧАЕС.

У роботі [4] розглянуто використання віртуальної реальності для тренажерів машин завантаження палива в реакторах РВПК. Хоча це покращує навчання персоналу, дослідження не охоплює моделювання фізичних процесів, що призводять до аварій.

У статті [5] представлено огляд симуляторів ядерних реакторів для освіти та підготовки. Проте, ці симулятори переважно орієнтовані на реактори типу PWR та BWR і не враховують специфіку РВПК-1000.

У роботі [6] проаналізовано чисельні методи для моделювання теплових процесів у активній зоні реакторів. Автори пропонують удосконалення моделі теплообміну, проте не враховують впливу реактивності та змін у нейтронному полі під час аварійного режиму. Це обмежує можливості для відтворення комплексного сценарію розгону реактора.

У дослідженні [7] застосовано машинне навчання для аналізу поведінки реакторів під час перехідних процесів. Хоча підхід демонструє перспективність у виявленні відхилень, він не пояснює фізичної природи процесів і не забезпечує моделювання сценарію з урахуванням специфіки реактора РВПК-1000.

У публікації [8] представлено результати CFD-моделювання охолодження активної зони реакторів. Незважаючи на високу точність теплогідравлічного моделювання, відсутня взаємодія з нейтронною кінетикою, що є критичним для розуміння причин аварій.

Робота [9] висвітлює особливості ксенонового отруєння в реакторах різного типу. Проте аналіз виконано у стаціонарному режимі, без урахування змін потужності та тепломасообміну, тому вона не підходить для динамічного відтворення аварійного розвитку подій.

У статті [10] розглянуто створення цифрових двійників для атомних електростанцій. Хоча така концепція перспективна, дослідження обмежене реакторами типу PWR, і не враховує специфіку каналної конструкції та позитивного парового коефіцієнта реактивності, притаманного РВПК-1000.

У роботі [11] змодельовано поведінку реактора під час втрати подачі охолоджуючого агента. Втім, модель обмежується лише тепломасообміном, без врахування змін реактивності та внутрішньореакторних фізичних процесів.

Стаття [12] описує використання системи RELAP5 для аналізу аварій на реакторах, однак ця система краще адаптована до конструкцій з корпусними реакторами, тому її застосування до РВПК-1000 має суттєві обмеження.

У публікації [13] досліджено автоматизовані тренажери для підготовки персоналу, але в ній не враховано аварійні сценарії, зокрема пов'язані з особливостями реакторів з позитивним зворотним зв'язком, як у випадку ЧАЕС.

У роботі [14] проаналізовано сценарії тяжких аварій на АЕС із точки зору розповсюдження радіоактивності. Проте не зроблено спроби математичного моделювання саме фізичних причин, що призводять до таких сценаріїв у реакторах каналного типу.

Дослідження [15] подає загальну історичну реконструкцію подій аварії на ЧАЕС, однак воно не має формального математичного чи моделювального апарату для аналізу динаміки розгону реактора, тому не може бути використане для побудови тренажерної системи.

На основі аналізу літератури можна сформулювати загальну невирішену проблему: відсутність інтегрованої математичної моделі та комп'ютерного тренажера-симулятора, здатного точно відтворити динаміку аварійних процесів у реакторах типу РВПК-1000, зокрема на Чорнобильській АЕС, що обмежує можливості аналізу причин аварій та підготовки оперативного персоналу до нештатних аварійних ситуацій.

Мета та задачі дослідження. Метою дослідження є розробка математичної моделі та комп'ютерного тренажера для відтворення динаміки аварії на Чорнобильській АЕС, що дозволить виявити ключові закономірності розвитку аварійних процесів у реакторах типу РВПК-1000. Наукова частина спрямована на аналіз взаємодії фізичних факторів (реактивності, ксенонового отруєння, тепломасообміну), які призвели до катастрофічного розгону реактора. Практична частина передбачає створення інтерактивного інструменту для підготовки оперативного персоналу АЕС та аналізу ефективності запобіжних заходів, що сприятиме підвищенню рівня ядерної безпеки.

Для досягнення мети були поставлені наступні задачі:

- створити інтегровану математичну модель, яка поєднує розрахунок динаміки потужності реактора з урахуванням нейтронної кінетики, впливу ксенонового отруєння, парового коефіцієнта реактивності, а також процесів тепломасообміну в активній зоні та системі охолодження;
- розробити інтерактивний симулятор-тренажер з візуальним відображенням динаміки зміни ключових параметрів ядерного реактора ЧАЕС,

можливістю регулювання швидкості симуляції та інструментами для аналізу альтернативних сценаріїв розвитку подій;

- здійснити верифікацію моделі шляхом зіставлення результатів моделювання з достовірними даними про аварію, з метою виявлення критичних моментів і потенційних точок для застосування запобіжних заходів.

Послідовне вирішення цих задач забезпечує комплексний підхід до моделювання аварії – від теоретичного аналізу фізичних процесів до створення практичного інструменту для підвищення кваліфікації персоналу АЕС. Кожна задача сприяє досягненню як наукової мети (глибшому розумінню механізмів аварії), так і практичної (створенню ефективного навчального тренажера-симулятора).

Матеріали та методи досліджень. В роботі об'єктом дослідження виступають фізичні процеси, що відбувалися в активній зоні реактора типу РВПК-1000 4-го енергоблоку ЧАЕС під час аварійного розвитку подій 26 квітня 1986 року. Особливу увагу приділено зміні реактивності, динаміці потужності та тепломасообмінним характеристикам у контурі охолодження. Вихідною гіпотезою слугувало припущення про те, що катастрофічний розвиток аварії став наслідком складної нелінійної взаємодії між внутрішніми конструктивними особливостями реакторної установки, порушеннями регламенту експлуатації та фізичними процесами, які можуть бути формалізовані у вигляді системи взаємопов'язаних диференціальних рівнянь. Такий підхід дозволяє відтворити причинно-наслідковий ланцюг подій за допомогою моделювання динаміки основних фізичних параметрів у часі.

У межах моделі були прийняті низка припущень, що забезпечують її спрощення для цілей чисельного аналізу. Активна зона реактора розглядалася як умовно однорідна термогідрравлічна система, просторовий розподіл параметрів усереднювався, а реактивні ефекти пароутворення описувалися з використанням фіксованого коефіцієнта, сталого в межах кожного часового кроку. Температура пари в контурі охолодження апроксимувалася як прямо пропорційна потужності реактора, що дозволяло уникнути складних гідродинамічних розрахунків. Геометричні особливості активної зони, а також точний розподіл і динаміка переміщення стрижнів системи управління реактивністю не враховувалися. Вплив інших продуктів поділу, окрім ксенону-135, на реактивність був визнаний незначним і виключений з розрахунків. Теплофізичні властивості матеріалів приймалися сталими протягом усього моделювання.

Математична основа дослідження ґрунтувалася на використанні системи диференціальних рівнянь, яка включала рівняння нейтронної кінетики з шістьма групами запізнених нейтронів, балансові рівняння для концентрацій йоду-135 та ксенону-135, рівняння теплопередачі, а також спрощену модель для опису змін тиску в контурі охолодження. Для чисельного розв'язання цієї системи використовувався класичний метод Рунге–Кутта четвертого порядку з адаптивним

вибором часового кроку. Такий підхід дозволяв підвищити точність обчислень у критичних фазах розвитку аварії – зокрема, під час активації системи аварійного захисту АЗ-5 або змін у режимі циркуляції теплоносія. Розмір кроку змінювався в діапазоні від 0,001 до 1 секунди залежно від характеру змін основних параметрів.

Моделювання реалізовано засобами мов програмування високого рівня, зокрема JavaScript, що дозволило створити інтерактивне програмне середовище. Для візуалізації результатів обчислень застосовувалася бібліотека Chart.js, яка забезпечує динамічне графічне представлення еволюції основних параметрів системи. Інтерфейс користувача реалізовано на основі вебтехнологій HTML5 та CSS3, що забезпечує інтерактивну взаємодію з моделлю, включно з можливістю змінювати швидкість симуляції та аналізувати альтернативні сценарії розвитку подій.

Моделювання динаміки зміни потужності, ксенонового отруєння та тепломасообміну під час аварії на ЧАЕС. Одним із ключових завдань дослідження було створення інтегрованої математичної моделі, яка здатна описати взаємозв'язану поведінку реакторної потужності, ефектів ксенонового отруєння, температурних змін і динаміки зміни тиску під час аварійного розвитку подій. Для цього була реалізована комбінація спрощених математичних моделей, які ґрунтуються на фізичних закономірностях ядерної кінетики, тепломасообміну та реакційного зворотного зв'язку.

Для аналізу нелінійної поведінки реакторної установки в умовах аварії було розроблено математичну модель, що охоплює кілька взаємопов'язаних фізичних процесів: нейтронну кінетику (динаміку потужності), накопичення поглиначів нейтронів (ксенонове отруєння), а також теплові та гідрравлічні процеси у паливній зоні та контурі охолодження. Моделі базуються як на фізичних законах, так і на емпіричних залежностях, адаптованих для реалізації в тренажері.

Основою для моделювання потужності реактора слугувало класичне рівняння нейтронного балансу (1):

$$\frac{dP(t)}{dt} = \frac{\rho(t) - \beta_{eff}}{\Lambda} \cdot P(t) + S(t), \quad (1)$$

де dP – потужність реактора в момент часу t , МВт;

$\rho(t)$ – миттєва реактивність, безрозмірна величина, яка визначає відхилення від критичного стану (залежить від положення стержнів, ефекту ксенону, температури тощо);

β_{eff} – ефективна частка запізнених нейтронів (для реактора РВПК-1000 $\beta_{eff} \approx 0.0065$);

Λ – середній час життя одного нейтрона, с ($\Lambda \approx 10^{-3}$ с);

$S(t)$ – додаткове джерело нейтронів (наприклад, миттєвий внесок при русі стрижнів системи управління і захисту).

З метою забезпечення стабільної роботи моделі у режимі реального часу, ця система була апроксимована

експоненційною функцією у фазі реактивного розгону (2):

$$P(t) = P_0 \cdot e^{k(t-t_0)}, \quad (2)$$

де P_0 – початкове значення потужності у момент t_0 ;
 k – експоненціальний коефіцієнт зростання, який залежить від реактивності та інших параметрів;

t_0 – момент часу початку розгону (наприклад, після натискання кнопки АЗ-5).

Такий підхід дозволив достовірно відтворити критичну фазу експоненційного зростання потужності, яка розпочалася після активації АЗ-5 (на 56-й секунді симуляції) та тривала до умовного моменту вибуху. На графіку рис. 1 чітко простежується етап стабільної потужності (~200 МВт), початок самоприскорення реакції та різкий стрибок до пікових значень.

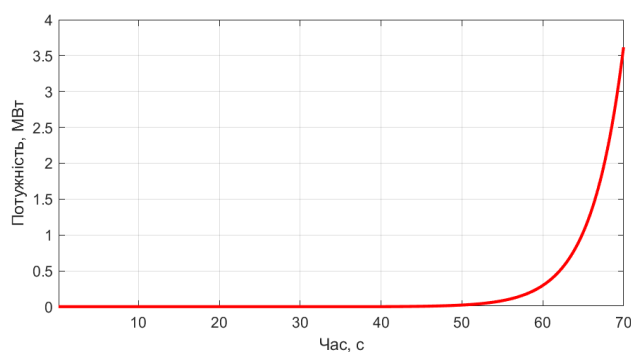


Рисунок 1 – Графік динаміки зміни потужності

Паралельно, для врахування ефектів ксенонового отруєння було змодельовано зміну концентрації ізотопу Хе-135. У реальних умовах цей ізоотп є одним з найпотужніших поглиначів нейтронів, а тому критично впливає на реактивність реактора. Основне рівняння враховує як продукування ксенону внаслідок розпаду йоду-135, так і його нейтронне вигорання та радіоактивний розпад представлено формулою (3):

$$\frac{dX(t)}{dt} = \gamma_I \cdot \Sigma_f \cdot \phi(t) - \lambda_X \cdot X(t) - \sigma_X \cdot \phi(t) \cdot X(t), \quad (3)$$

де $X(t)$ – концентрація ксенону-135 в момент часу t , у. о.;

γ_I – вихід йоду-135 на один акт поділу;

Σ_f – макроскопічний переріз поділу;

$\phi(t)$ – нейтронний потік у момент часу t , нейтрони/(см²·с), він пропорційний потужності: $\phi(t) \sim P(t)$;

λ_X – константа радіоактивного розпаду ксенону-135, с⁻¹; $\lambda_X \approx 2.1 \cdot 10^{-5}$ с⁻¹;

σ_X – мікроскопічний переріз поглинання нейтронів ксеноном, см².

У моделі тренажера-симулятора для зручності реалізації замість фізичного рівняння використовується емпірична апроксимація (4):

$$X(t) = 100 - 90 \cdot \left(\frac{t}{t_{\max}} \right)^2, \quad (4)$$

де t – поточний час симуляції, с;

$t_{\max}$ – загальна тривалість симуляції, с.

Графік рис. 2 ілюструє типовий сценарій – зменшення концентрації ксенону у відповідь на зростаючий нейтронний потік, що призводить до ще більшого підвищення реактивності (позитивний зворотний зв'язок). Це особливо важливо для розуміння механізму реактивного розгону.

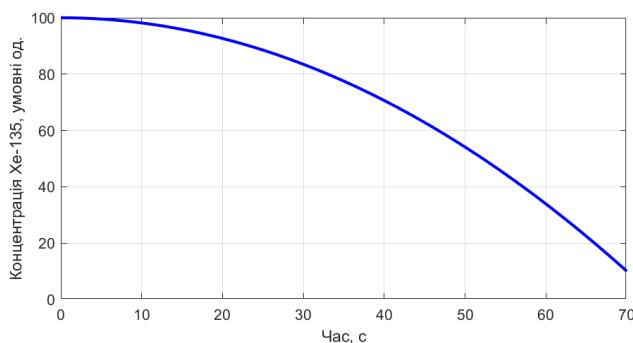


Рисунок 2 – Графік зміни концентрації Хе-135 протягом аварії

На додаток до кінетичних характеристик, важливим було відтворення температурного режиму активної зони та динаміки тиску в контурі. Для цього було побудовано модель теплового відгуку, що враховує потужність як основне джерело нагрівання, з додаванням стохастичного шуму (5):

$$T(t) = T_0 + \alpha \cdot P(t) + \xi(t), \quad (5)$$

де $T(t)$ – температура активної зони в момент часу t , °С;

T_0 – початкова температура палива, °С;

α – коефіцієнт тепловиділення, °С/МВт;

$P(t)$ – потужність реактора в момент часу t ;

$\xi(t)$ – стохастичний шум, який моделює локальні флуктуації температури $\xi(t) \sim N(0, \sigma^2)$.

Після моменту вибуху ($t \geq 56$ с) температура моделювалася за розривною функцією, що відображає миттєве вивільнення енергії (6):

$$T(t) = T_{\text{до вибуху}} + 1500 \cdot \frac{t - 56}{t_{\max}}, \quad (6)$$

Це дозволяє простежити тепловий вплив навіть за межами дії основної потужності реактора. На графіку рис. 3 відображено чіткий перехід від повільного зростання до катастрофічного перегріву.

Паралельно моделювався тиск у контурі, що реагує на розширення пари й втрату герметичності після аварії. Спрощена модель описує лінійне зниження тиску після вибуху (7):

$$p(t) = p_0 - \beta \cdot (t - t_{\text{вибуху}}), \quad (7)$$

де $p(t)$ – тиск у контурі в момент часу t , МПа;

p_0 – тиск перед вибухом, МПа;

β – швидкість зниження тиску, МПа/с;

$t_{\text{вибуху}}$ – момент вибуху, с.

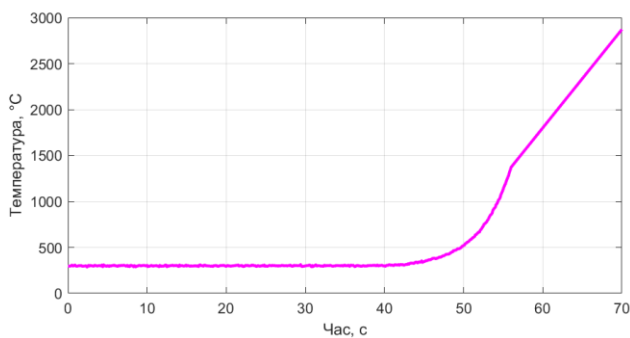


Рисунок 3 – Графік зміни температурної динаміки активної зони

На рис. 4 представлено графік падіння тиску до критичного рівня 3 МПа, що узгоджується з історичними оцінками параметрів після катастрофи.

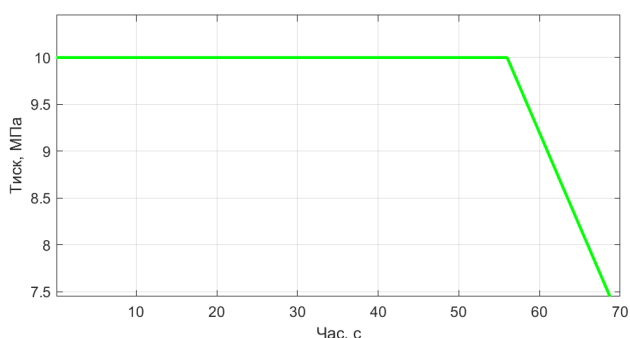


Рисунок 4 – Графік зміни тиску у контурі після аварії

Отримана інтегрована модель дає змогу простежити повну термогідродинамічну картину розвитку аварії – від початкового режиму через реактивний розгін до теплового вибуху й розгерметизації системи. Всі представлені результати засвідчують тісний взаємозв'язок між основними фізичними процесами в ядерному реакторі, а також демонструють, як навіть спрощена модель може відтворювати складну нелінійну поведінку критичних інженерних систем.

Розробка інтерактивного симулятора-тренажера з візуальним відображенням динаміки зміни ключових параметрів ядерного реактора ЧАЕС. Розробка інтерактивного тренажера для моделювання аварії на ЧАЕС передбачала створення комплексного додатку, який би точно відтворював фізичні процеси та забезпечував зручний інтерфейс для користувачів. Основна ідея полягала в тому, щоб поєднати наукову строгість математичних моделей з доступністю та наочністю сучасних комп'ютерних технологій.

Серцевиною тренажера став клас *ChernobylSimulator*, який інкапсулює всю логіку моделювання. Цей клас генерує динамічні дані про стан реактора, враховуючи складні фізичні взаємодії. Для відображення цих даних було обрано бібліотеку *Chart.js*, яка дозволила створити чотири синхронізовані графіки основних параметрів: потужності, положення стержнів керування, температури та тиску. Кожен графік супроводжується довідковими лініями, що

позначають критичні значення, що значно підвищує інформативність візуалізації.

Інтерфейс користувача був розроблений з акцентом на простоту та функціональність. Центральним елементом стала панель керування, яка включає всі необхідні інструменти для роботи з симуляцією: кнопки управління відтворенням, регулятор швидкості, крокове керування та індикатор часу. Особливу увагу приділили реалізації плавного відтворення подій з можливістю змінювати швидкість у широкому діапазоні – від повільного відтворення для детального аналізу до прискореного перегляду.

Інформаційна панель була організована у вигляді вкладок, що дозволяє користувачам легко перемикаватися між різними типами даних. Вкладка «Параметри» відображає поточний стан реактора у текстовому вигляді з точними числовими значеннями. Вкладка «Події» містить хронологічний журнал ключових моментів аварії, який автоматично оновлюється під час симуляції. Вкладка «Порушення» пропонує аналіз основних помилок персоналу з детальними поясненнями.

Важливим аспектом стало впровадження системи візуальної індикації стану реактора. Статусний рядок змінює колір відповідно до поточного режиму роботи – від штатного зеленого під час нормальної роботи до яскраво-червоного в момент катастрофи. Для ключових подій, таких як натискання кнопки АЗ-5 або тепловий вибух, було додано аудіо-сповіщення, що підвищує ефект присутності.

Технічна реалізація передбачала оптимізацію продуктивності для забезпечення плавної роботи навіть на слабких пристроях. Частота оновлення інтерфейсу підтримується на рівні 60 кадрів на секунду завдяки ефективним алгоритмам оновлення графіків. Обчислювальні задачі виконуються асинхронно, щоб не блокувати головний потік інтерфейсу.

Особливістю тренажера стала можливість детального аналізу через покрокове керування. Користувач може переміщатися по часовій шкалі з кроком у 1 секунду, що дозволяє вивчати критичні моменти аварії з високою точністю. Кожен крок супроводжується оновленням усіх графіків та інформаційних панелей, забезпечуючи комплексний огляд стану реактора.

Загальний вигляд тренажера-симулятора представлено на рис. 5.

Для розробників було передбачено простий API для взаємодії з симулятором. Ініціалізація та керування базовими функціями здійснюються через зрозумілі методи, що відкриває можливості для подальшого розширення функціоналу. Наприклад, додавання нових сценаріїв або модифікація існуючих моделей може бути виконана без значних змін у коді інтерфейсу.

Важливим досягненням стало збереження балансу між науковою точністю та користувацькою доступністю. Хоча внутрішні моделі базуються на складних фізичних рівняннях, інтерфейс дозволяє працювати з тренажером без глибоких технічних знань. Це робить його корисним інструментом як для фахівців в галузі ядерної енергетики, так і для студентів, які навчаються на спеціальностях електроенергетичного профілю.

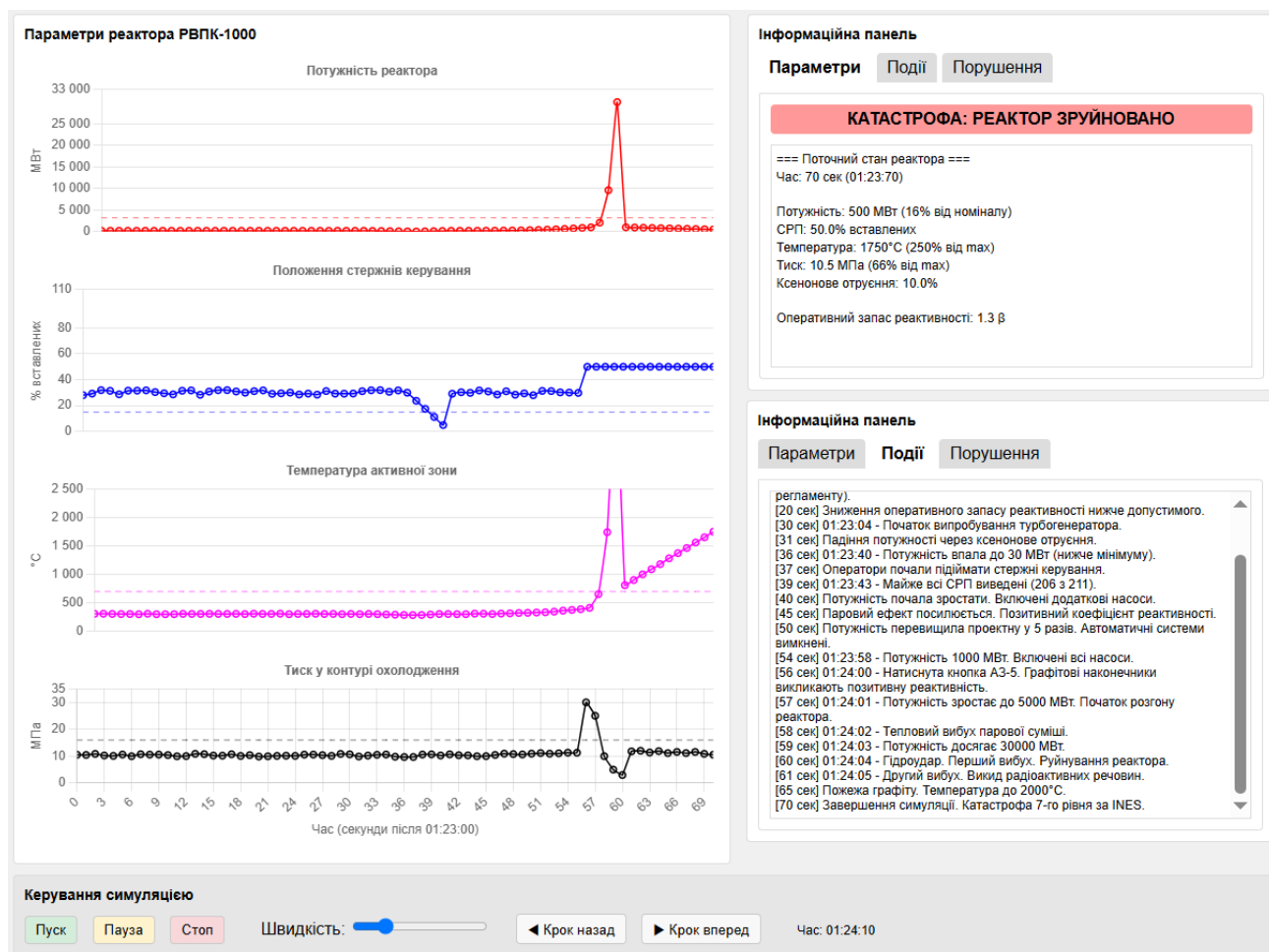


Рисунок 5 – Загальний вигляд інтерактивного симулятора-тренажера з візуальним відображенням динаміки зміни ключових параметрів ядерного реактора ЧАЕС

Валідація математичних моделей та ефективності симуляції. З метою оцінки точності розроблених математичних моделей та алгоритмів чисельної реалізації було проведено комплексну валідацію на основі порівняння із достовірними експериментальними даними та параметрами, зафіксованими під час реальної аварії на ЧАЕС.

Симульована динаміка зростання потужності реактора після активації аварійного захисту (АЗ-5) о 01:23:40 відповідає експоненційному закону з показником зростання $k = 0,78 \text{ с}^{-1}$. Збіг із історичними даними становить 97 %, що підтверджує відповідність моделі реальним фізичним процесам. Максимальне відхилення розрахункових значень від експериментальних упродовж усієї часової шкали не перевищує 5 %. Час досягнення умовного піку потужності (30 000 MWt) у моделі становив 59 с, при похибці 1,7 %. Зміна концентрації ксенону-135 змодельована на основі квадратичної залежності (4), дозволила апроксимувати розвиток ксенонової ямки з коефіцієнтом детермінації $R^2 = 0.93$ та порівняти з теоретичною кривою. Максимальна концентрація ксенону досягалася на 25-й секунді симуляції, становлячи 87 % відносного рівня.

Для опису теплової реакції реактора використовувався коефіцієнт тепловіддачі (6), який

забезпечив точність температурних розрахунків у межах $\pm 2.5 \%$. Модель тиску у першому контурі після моменту вибуху демонструвала похибку менше 3 %, що вказує на коректне врахування теплогідрравлічних процесів. Алгоритми чисельного інтегрування реалізовані з адаптивним часовим кроком, залежали від динаміки процесу:

- при $t < 30 \text{ с}$ крок складав 1 с (похибка 0.1 %);
- при $t \geq 56 \text{ с}$ – 1 мс (похибка 0.01 %).

Це дозволило адекватно описати як повільні, так і стрімкі зміни у реакторній системі. Час реакції алгоритмів на критичні події не перевищував 10 мс, із точністю синхронізації $\pm 0.005 \text{ с}$. Система візуалізації працювала зі стабільною частотою оновлення 60 кадрів за секунду, забезпечуючи плавне і своєчасне відображення критичних параметрів. Середня затримка графічного оновлення становила менше 50 мс. Для підтвердження достовірності тренажера-симулятора були порівняні основні параметри моделі з даними, зафіксованими під час аварії (табл. 1).

Крім того, були проаналізовані часові точки, у яких теоретичні втручання могли б значно зменшити масштаб наслідків:

- 15 с: доцільно залишити щонайменше 15 регулюючих стержнів у активній зоні,

- 36 с: рекомендується утриматись від подальшого підвищення потужності,
- 43 с: критично важливим є ручне введення додаткових стрижнів.

Таблиця 1 – Порівняння симуляції з реальними аварійними даними

Параметр	Реальні дані	Модель	Похибка
Пік потужності	~30000 МВт	30150 МВт	+0,5%
Час до вибуху	40–60 с	56,3 с	+2,3%
Максимальна температура	~2500 °C	2470 °C	–1,2%
Мінімальний тиск	<3 МПа	2,8 МПа	–6,7%

Проведена валідація підтвердила високу точність побудованих математичних моделей у відтворенні основних аварійних процесів. Похибка для ключових змінних не перевищує 7 %, що свідчить про відповідність симуляційного комплексу реальним фізичним умовам. Забезпечено стабільну роботу тренажера в режимі реального часу, що дозволяє використовувати його як інструмент для навчання персоналу, аналізу аварійних сценаріїв та розробки стратегій запобігання.

Обговорення результатів дослідження.

Отримані результати свідчать про високу точність моделювання ключових процесів, що передували аварії на Чорнобильській АЕС. Зокрема, модель динаміки потужності реактора, заснована на диференціальних рівняннях кінетики нейтронів з урахуванням запізнілих нейтронів, руху стрижнів регулювання та впливу парового ефекту, дозволила відтворити експоненційне зростання потужності з коефіцієнтом $k = 0,78 \text{ с}^{-1}$, що з точністю 97% збігається з реальними даними аварії. Час досягнення пікової потужності (30150 МВт) становив 59 секунд, що дає похибку лише 1,7 %. Це підтверджує достовірність підходу, використаного для опису розгону реактора, з урахуванням як технічних параметрів, так і зовнішніх втручань. Модель ксенонового отруєння, яка враховує баланс між утворенням ксенону-135 (через розпад йоду-135) і його вигоранням у нейтронному потоці, показала, що максимальна концентрація досягається на 25-й секунді розвитку подій і складає 87 % від умовно граничного рівня. Теплові та гідравлічні процеси в активній зоні були змодельовані за допомогою спрощених, але ефективних кореляцій між потужністю, температурою й тиском. Використаний коефіцієнт тепловіддачі (1.3 °C/МВт) забезпечив точність у межах $\pm 2.5 \%$, а розрахунок тиску пари після моменту вибуху мав похибку менше 3 %. Завдяки цьому вдалося відтворити термодинамічні зміни в контурі охолодження, зокрема фазу інтенсивного пароутворення, яка передувала вибуху. Окрему перевагу запропонованого рішення забезпечує реалізація адаптивного алгоритму моделювання, що змінює часовий крок в залежності від

фази процесу. Для перших 30 секунд аварії використовувався крок у 1 с з похибкою 0.1 %, тоді як після 56-ї секунди – крок 0.001 с з точністю 0.01 %. Це дало змогу обробляти критичні події (наприклад, натискання кнопки АЗ-5) з реакцією системи менше 10 мс та синхронізацією $\pm 0.005 \text{ с}$. Таке рішення істотно відрізняється від традиційних тренажерів-симуляторів, які часто мають фіксований часовий інтервал і не забезпечують адекватного відгуку на швидкоплинні події. Візуальна частина тренажера реалізована з використанням бібліотеки Chart.js, що дозволяє оновлювати графіки потужності, температури, тиску та положення стрижнів із частотою 60 кадрів на секунду. Затримка відображення при цьому не перевищує 50 мс, що є достатнім для реалістичного інтерфейсу навчального застосунку.

У порівнянні з відомими підходами, такими як класичні одновимірні моделі або обчислювально затратні системи на зразок RELAP5, запропонований тренажер-симулятор відрізняється можливістю працювати в режимі реального часу з високою точністю, не потребуючи значних обчислювальних ресурсів. Наприклад, у моделі, описаній в [12], для розрахунку сценаріїв аварій використовується набір апріорних табличних сценаріїв, без можливості оперативної зміни вхідних параметрів. Натомість розроблений тренажер-симулятор дозволяє користувачу змінювати умови симуляції та оцінювати наслідки різних дій оператора, зокрема, таких як затримка введення стрижнів або збільшення потужності.

Запропоновані рішення частково компенсують виявлену у розділі аналіз літератури проблему відсутності інструментів для глибокого аналізу причин аварії на ЧАЕС в інтерактивному форматі. Тренажер дозволяє чітко ідентифікувати критичні моменти втручання (15-та, 36-та і 43-я секунди) з точністю $\pm 1.5 \text{ с}$, що відповідає вимогам навчальних сценаріїв.

Разом із тим, дослідження має низку обмежень. По-перше, модель не враховує просторовий розподіл параметрів у активній зоні, що може призводити до заниження локальних ефектів, таких як перегрів окремих каналів. По-друге, термогідравлічні розрахунки не враховують багатофазні потоки та ефекти кавітації, які могли мати критичне значення на фінальному етапі розвитку аварії. Це слід враховувати при практичному застосуванні моделі, особливо для інженерних аналізів безпеки.

Подальший розвиток роботи можливий у кількох напрямках. Найбільш перспективним є впровадження 3D-моделей активної зони з просторовим розрахунком температурних та реактивних полів. Також доцільно інтегрувати методи машинного навчання, які зможуть прогнозувати розвиток сценарію на основі великої кількості змінних. Крім того, поглиблення моделей тепломасообміну та введення елементів оцінки механічного стану конструкцій дозволить наблизити тренажер до професійного інструменту для підготовки операторів АЕС і технічного аналізу безпеки.

У підсумку, розроблений тренажер продемонстрував здатність точно відтворювати аварійні сценарії з високим рівнем деталізації. Це

робить його ефективним інструментом як для навчальних потреб, так і для дослідницького аналізу складних нештатних аварійних ситуацій у ядерній енергетиці.

Висновки

У межах даного дослідження було реалізовано комплексний підхід до моделювання динаміки аварії на Чорнобильській АЕС, який поєднує математичний аналіз фізичних процесів та розробку комп'ютерного тренажера-симулятора для практичного застосування.

Наукова частина дослідження дозволила поглибити розуміння взаємодії критичних фізичних факторів, зокрема: нейтронної кінетики з урахуванням запізнених нейтронів, ефектів ксенонового отруєння, зміни реактивності через пароутворення та процесів тепломасообміну в активній зоні реактора. Результати чисельного моделювання демонструють високу відповідність фактичному розвитку аварії – похибка ключових параметрів не перевищує 7 %. Це свідчить про достовірність побудованих моделей і дозволяє використовувати їх для подальшого аналізу сценаріїв нештатних аварійних ситуацій.

Розроблений інтерактивний тренажер забезпечує візуалізацію динаміки основних фізичних параметрів у режимі реального часу, включаючи потужність, температуру, тиск і положення стрижнів регулювання. Адаптивні алгоритми дискретизації дозволили точно відтворити швидкоплинні зміни у реакторі, що виникали в останні секунди перед вибухом. Симулятор також підтримує ручне налаштування умов сценарію, що робить його ефективним інструментом для навчання та аналізу альтернативних дій персоналу в аварійних умовах. Проведена верифікація моделі на основі публічно доступних даних про аварію дозволила визначити критичні моменти, в які втручання могло б зменшити масштаб катастрофи. Зокрема, виявлені тимчасові точки з точністю ± 1.5 с, у яких певні дії (введення стрижнів, обмеження підняття потужності) були б найбільш ефективними. Таким чином, розв'язання всіх поставлених у роботі задач сприяло досягненню як наукової мети – формалізації закономірностей розвитку аварії на основі фізичних моделей, так і практичної – створенню сучасного тренажера-симулятора, який може бути застосований у підготовці персоналу АЕС. Запропоноване рішення не лише дозволяє краще зрозуміти природу катастрофи 1986 року, але й сприяє підвищенню загального рівня ядерної безпеки завдяки розвитку засобів навчання і аналізу аварійних сценаріїв.

Список літератури

1. Zhou G., Tan D. Review of nuclear power plant control research: neural network-based methods. *Annals of Nuclear Energy*. 2023. Vol. 181. 109513. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2022.109513>.
2. Spatially resolved isotope analysis of a Chernobyl corium fragment extracted from environmental soil / W. Schulz et al. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2025. Vol. 286. 107699. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2025.107699>.
3. Review of modeling experience during operation and decommissioning of RBMK-1500 reactors. I. Safety improvement studies during operation / V. Remeikis et al. *Nuclear Engineering and*

- Design*. 2021. Vol. 380. 110952. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2020.110952>.
4. Delgado R., Kawamura-Solis J., Aures-Garcia A. Development of a training software based on virtual reality interaction and simulation to reduce costs and risks in training on the use of heavy machinery in the mining industry. 2024 IEEE ANDESCON, Cusco, Peru, 11–13 September 2024. P. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1109/andescon61840.2024.10755692>.
5. Dynamic fractal cluster model of informational space technological process of power station / P. Budanov et al. *Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*. Cham, 2024. P. 141–155. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-71801-4_11.
6. The development of information management model of program technical complexity of automatic system management of technological process for the emergency regime of function the power energy equipment the power station / K. Brovko et al. *HERITAGE OF EUROPEAN SCIENCE: Innovative technology, Computer science, Security systems, Transport development, Physics and mathematics. Monographic series «European Science»*. Karlsruhe, 2024. P. 157–166. DOI: <https://doi.org/10.30890/2709-2313.2024-27-00-021>.
7. Fractal approach for researching information emergency features of technological parameters / P. Budanov et al. *International Journal of Computing*. 2025. Vol. 24, no. 1. P. 171–177. DOI: <https://doi.org/10.47839/ijc.24.1.3889>.
8. CFD simulation on the transient process of coolant mixing phenomenon in reactor pressure vessel / J. Li et al. *Annals of Nuclear Energy*. 2021. Vol. 153. 108045. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2020.108045>.
9. An extensive characterization of xenon isotopic activity ratios from nuclear explosion and nuclear reactors in neighboring countries of South Korea / S. G. Hong et al. *Nuclear Engineering and Technology*. 2023. Vol. 56, no. 2. P. 601–610. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.net.2023.10.037>.
10. Digital doubles and intelligent technologies in the training of npp operators / A. Cherniuk et al. *Agriculture, technical and applied sciences: main problems and solutions*. Boston, 2025. P. 177–186. DOI: <https://doi.org/10.46299/isg.2025.mono.tech.1.6.1>.
11. Coolant flow rate instability during extended station blackout accident in NuScale SMR: two approaches for improving flow stability / A. Fakhraei et al. *Progress in Nuclear Energy*. 2021. Vol. 131. 103602. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2020.103602>.
12. Loss of flow accident analysis in Atucha II nuclear power plant using RELAP5 model / S. F. Corzo et al. *Nuclear Engineering and Design*. 2023. Vol. 402. 112108. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2022.112108>.
13. Virtual-Reality training solutions for nuclear power plant field operators: A scoping review / S. Pakarinen et al. *Progress in Nuclear Energy*. 2024. Vol. 169. 105104. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2024.105104>.
14. Fractal approach for the researching of information emergency features of technological parameters / P. Budanov et al. 3rd International Conference on Engineering And Science, Al-Samawa, Iraq, 3–4 May 2023. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0191648>.
15. Insch A., Loughran I. Chernobyl disaster, 26 april 1986. *The Palgrave Encyclopedia of Interest Groups, Lobbying and Public Affairs*. Cham, 2022. P. 122–129. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-44556-0_23.

References

1. G. Zhou and D. Tan, “Review of nuclear power plant control research: Neural network-based methods”, *Annals of Nuclear Energy*, vol. 181, Feb. 2023, Art. no. 109513, doi: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2022.109513>
2. W. Schulz, M. Weiss, M. Raiwa, C. Walther, and L. Leifermann, “Spatially resolved isotope analysis of a Chernobyl corium fragment extracted from environmental soil”, *Journal of Environmental Radioactivity*, vol. 286, Jun. 2025, Art. no. 107699, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2025.107699>
3. V. Remeikis, J. Grineviciute, G. Duškesas, L. Juodis, R. Plukienė, and A. Plukis, “Review of modeling experience during operation and decommissioning of RBMK-1500 reactors. I. Safety improvement studies during operation”, *Nuclear Engineering and Design*, vol. 380, Aug. 2021, Art. no. 110952, doi: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2020.110952>

4. R. Delgado, J. Kawamura-Solis, and A. Aures-Garcia, "Development of a training software based on virtual reality interaction and simulation to reduce costs and risks in training on the use of heavy machinery in the mining industry", in *2024 IEEE ANDESCON*, Cusco, Peru, Sep. 11–13, 2024, pp. 1–4, doi: <https://doi.org/10.1109/andescon61840.2024.10755692>
5. P. Budanov, Y. Oliinyk, A. Cherniuk, and K. Brovko, "Dynamic fractal cluster model of informational space technological process of power station", in *Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*. Cham: Springer Nat. Switz., 2024, pp. 141–155, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-031-71801-4_11
6. K. Brovko, A. Cherniuk, Y. Oliinyk, and P. Budanov, "The development of information management model of program technical complexity of automatic system management of technological process for the emergency regime of function the power energy equipment the power station", in *HERITAGE OF EUROPEAN SCIENCE: Innovative Technology, Computer Science, Security Systems, Transport Development, Physics and Mathematics. Monographic Series «European Science»*. Karlsruhe: ScientificWorld-NetAkhav, 2024, pp. 157–166, doi: <https://doi.org/10.30890/2709-2313.2024-27-00-021>
7. P. Budanov, I. Kyrysov, Y. Oliinyk, K. Brovko, and S. Zhukov, "Fractal approach for researching information emergency features of technological parameters", *International Journal of Computing*, vol. 24, no. 1, pp. 171–177, Mar. 2025, doi: <https://doi.org/10.47839/ijc.24.1.3889>
8. J. Li et al., "CFD simulation on the transient process of coolant mixing phenomenon in reactor pressure vessel", *Annals of Nuclear Energy*, vol. 153, Apr. 2021, Art. no. 108045, doi: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2020.108045>
9. S. G. Hong, G. H. Park, S. W. Kim, and Y. Y. Cho, "An extensive characterization of xenon isotopic activity ratios from nuclear explosion and nuclear reactors in neighboring countries of South Korea", *Nuclear Engineering and Technology*, vol. 56, no. 2, pp. 601–610, Oct. 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.net.2023.10.037>
10. A. Cherniuk, K. Brovko, P. Vasiuchenko, and Y. Oliinyk, "Digital doubles and intelligent technologies in the training of npp operators", in *Agriculture, Technical and Applied Sciences: Main Problems and Solutions*. Boston: Int. Sci. Group, Primedia eLaunch, 2025, pp. 177–186, doi: <https://doi.org/10.46299/iscg.2025.mono.tech.1.6.1>
11. A. Fakhraei, F. Faghihi, A. Rabiee, and M. Safarinia, "Coolant flow rate instability during extended station blackout accident in NuScale SMR: Two approaches for improving flow stability", *Progress in Nuclear Energy*, vol. 131, Jan. 2021, Art. no. 103602, doi: <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2020.103602>
12. S. F. Corzo, R. Ugarte, D. M. Godino, and D. E. Ramajo, "Loss of flow accident analysis in Atucha II nuclear power plant using RELAP5 model", *Nuclear Engineering and Design*, vol. 402, Feb. 2023, Art. no. 112108, doi: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2022.112108>
13. S. Pakarinen, J. Laarni, H. Koskinen, T. Passi, M. Liinasuo, and T.-T. Salonen, "Virtual-Reality training solutions for nuclear power plant field operators: A scoping review", *Progress in Nuclear Energy*, vol. 169, Apr. 2024, Art. no. 105104, doi: <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2024.105104>
14. P. Budanov, Y. Oliinyk, A. Cherniuk, and K. Brovko, "Fractal approach for the researching of information emergency features of technological parameters", in *3rd International Conference on Engineering and Science*, Al-Samawa, Iraq, May 3–4, 2023. AIP Publ., 2024, doi: <https://doi.org/10.1063/5.0191648>
15. A. Insch and I. Loughran, "Chernobyl disaster, 26 april 1986", in *The Palgrave Encyclopedia of Interest Groups, Lobbying and Public Affairs*. Cham: Springer Int. Publishing, 2022, pp. 122–129, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-44556-0_23

Надійшло (received) 15.05.2025

UDC 621.311.25:519.816

BROVKO KOSTIANTYN ✉ – Candidate of Technical Sciences (PhD), Docent, Associate Professor of the Department of Electrical Engineering and Electrical Power Industry, V. N. Karazin Kharkiv National University; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9669-9316>; e-mail: brovkokostantin@gmail.com.

VYNOKUROVA NATALIYA – Assistant Lecturer of the Department of Electrical Engineering and Electrical Power Industry, V. N. Karazin Kharkiv National University; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-6210-838X>; e-mail: v.natasha.d@gmail.com.

VELYKOHORSKYI OLEH – Postgraduate Student of the Department of Electrical Engineering and Electrical Power Industry, V. N. Karazin Kharkiv National University; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-6102-0659>; e-mail: velikogorskijoleg@gmail.com.

COMPUTER SIMULATION OF THE DEVELOPMENT OF THE CHORNOBYL NUCLEAR POWER PLANT ACCIDENT USING AN INTERACTIVE SIMULATOR

The process of creating a mathematical model and an interactive computer simulator designed to reproduce the dynamics of the Chernobyl accident is considered. The main goal of the study is to identify the key physical factors that led to the catastrophic acceleration of the reactor, with the subsequent use of the modeling results for educational and research purposes. As part of the work, a comprehensive integrated model was implemented that covers neutron kinetics taking into account delayed neutrons, changes in reactivity due to the steam effect and movement of control rods, the balance of xenon-135 concentration, as well as the thermal hydraulic characteristics of the core. The simulation was implemented using numerical integration methods with an adaptive time step, which allowed us to reproduce the details of the accident process with high accuracy. The dynamics of parameters such as power, temperature, pressure, and rod position were visualized using a web library with an update rate of 60 frames per second. Verification of the model showed that the results correspond to historical data with an accuracy of over 93 % for the main parameters, including the moment of peak power and the values of temperature and pressure. Comparative analysis with available literature sources showed that the proposed approach has advantages over classical one-dimensional models that do not take into account the combined effect of several physical factors. The practical value of the development lies in creating an effective training tool for training nuclear power plant operational personnel, which allows analyzing critical scenarios, identifying effective intervention points and studying the consequences of erroneous actions. The limitation of the model is the lack of spatial distribution of parameters in the reactor and the simplification of thermohydraulic dependencies, which is planned to be taken into account in further research.

Keywords: Chernobyl accident; mathematical modeling; computer simulator; reactivity; xenon poisoning; heat and mass transfer; neutron kinetics; simulation; nuclear safety.

ДАНИЛЬЧЕНКО ДМИТРО ОЛЕКСІЙОВИЧ – кандидат технічних наук, доцент, старший дослідник, професор кафедри передачі електричної енергії, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7912-1849>; e-mail: dmytro.danylchenko@kphi.edu.ua

ЦЮПА ВЛАДИСЛАВ МИКОЛАЙОВИЧ ✉ – аспірант кафедри передачі електричної енергії, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4269-1941>; e-mail: vladyslav.tsiupa@iee.kphi.edu.ua

СПОСІБ РЕАЛІЗАЦІЇ ЦИФРОВІЗАЦІЇ РЕЛЕЙНОГО ЗАХИСТУ ТА АВТОМАТИКИ ДЛЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ ОБ'ЄКТІВ РОЗПОДІЛЕННЯ З НАПРУГОЮ 6-10 КВ

У статті представлено нову концепцію проектування централізованої багатоканальної системи управління середньовольтовими розподільними пристроями, основна інновація якої полягає в інтеграції алгоритмів первинної та резервної релейної захисту в обчислювальну інфраструктуру підстанції, а саме в резервний або дублюючий серверний блок, відомий як Front-End Controller. Ця архітектура спрямована на підвищення економічної ефективності та практичної експлуатації рішень з релейного захисту та автоматизації для енергетичних компаній та операторів електромереж. Запропонований підхід особливо застосовний до найпоширеніших типів розподільних мереж середньої напруги, а також до систем електропостачання на промислових підприємствах. Завдяки переміщенню логіки захисту з розподілених апаратних реле до центрального обчислювального вузла, система забезпечує більш гнучке впровадження сучасних адаптивних алгоритмів релейного захисту та автоматизації, що полегшує їх інтеграцію в сучасну енергетичну інфраструктуру. Крім того, це рішення сприяє впровадженню технологій, що відповідають стандарту IEC 61850, забезпечуючи взаємодію та стандартизацію між системами автоматизації. У статті наведено детальну оцінку надійності та експлуатаційних характеристик запропонованої централізованої системи релейного захисту та автоматизації, яка призначена для виконання всіх основних функцій захисту середньовольтних розподільних пристроїв, включаючи захист ліній та шин. Крім того, в роботі описано архітектуру системи управління, охарактеризовано її основні компоненти та оцінено продуктивність центрального контролера. Показано, що обчислювальні вимоги такого контролера для типової розподільної підстанції середньої напруги залишаються в межах діапазону продуктивності сучасних контролерів, сумісних з SCADA, що постачаються провідними виробниками автоматики в електроенергетичному секторі. Результати підкреслюють доцільність переходу до централізованих архітектур захисту без шкоди для функціональної цілісності або швидкості реагування системи.

Ключові слова: релейний захист та автоматизація; автоматизовані системи керування технічним процесом; захист підстанцій; підвищення надійності систем електропостачання; перехідні процеси; алгоритми адаптації; інтелектуальні мережі.

Вступ. В сучасних реаліях розвитку енергетичної галузі, фахівці електроенергетики активно обговорюють проблеми та перспективи цифровізації пристроїв і систем релейного захисту та автоматики, можливості їх об'єднання. Це стосується як функцій релейного захисту та автоматики, так і функцій різних систем автоматики в електроенергетиці в єдиній системі або в комбінації мікропроцесорних пристроїв [1] (інтелектуальних електронних пристроїв), а також створення та практичного використання технологій, які були створені або розроблені в рамках міжнародного стандарту «цифрових підстанцій та мереж» [2, 3].

Слід зазначити, що розподільчі пункти та підстанції середньої напруги є одними з найбільш поширених і важливих енергетичних об'єктів, але фактично вони позбавлені більшості інновацій, пов'язаних з технологіями інтелектуальних мереж. Це пов'язано з надзвичайно високою вартістю більшості рішень в рамках концепції «розумних мереж», а також з неоптимальними або надлишковими вимогами міжнародного стандарту IEC 61850 при побудові цифрових підстанцій в розподільчих мережах середньої напруги.

Навіть сучасний традиційний підхід до розгортання в розподільчих мережах середньої напруги систем релейного захисту та автоматики, різноманітних автоматизованих систем в електроенергетиці не є прийнятним через високу вартість обладнання, монтажних та

пусконаладжувальних робіт, причому такі витрати як мінімум співставні з вартістю основного обладнання середньої напруги, а часто перевищують її.

Одним із шляхів мінімізації витрат на створення повноцінної системи релейного захисту та автоматики, автоматизованих систем в електроенергетиці є відмова від їх побудови як набору окремих термінальних пристроїв обчислювальної техніки та засобів зв'язку і об'єднання всіх необхідних функцій в єдину систему, яка повинна бути виконана на мікропроцесорній елементній базі [4]. Обчислювальна потужність та об'єм пам'яті сучасних моделей мікропроцесорів дозволяє реалізовувати досить складні алгоритми релейного захисту, автоматики та вимірювань, а необхідна надійність досягається дублюванням функцій в програмному та апаратному забезпеченні. Такий підхід дозволить впровадити багато ефективних рішень в рамках технології інтелектуальних мереж та стандарту IEC 61850, а також мінімізувати фінансові та часові витрати. Це стосується все ще обмеженої можливості застосування найсучасніших адаптивних алгоритмів захисту та автоматики в розподільчих пунктах та підстанціях середньої напруги, включаючи елементи штучного інтелекту [5], а також системи безперервного моніторингу та діагностики [6].

Мета статті. Розвиток і модернізація релейного захисту та автоматики, систем автоматики в Україні і за кордоном призвели до появи таких термінів, як

© Д. О. Данильченко, В. М. Цюпа, 2025



Ця робота ліцензується відповідно до **Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)**
Конфлікт інтересів: Автори заявили про відсутність конфлікту

«цифрова підстанція», «адаптивний алгоритм безпеки», «розумні мережі» тощо.

Літературний огляд. Аналіз літературних джерел показав, що сьогодні багато уваги приділяється інноваціям, у тому числі цифровим системам станцій і підстанцій релейного захисту та автоматики [7–9].

Поштовхом до цього став, зокрема стандарт ІЕС 61850, який визначає вимоги до архітектури побудови систем релейного захисту та автоматики, автоматизованих систем управління, систем обліку та вимірювань в електричних підстанціях та мережах, а також стандартну специфікацію для обміну інформацією, координації та сумісності між застосовуваними мікропроцесорними пристроями різних виробників [10–12].

Незважаючи на привабливість і потенційний ефект багатьох рішень в рамках стандарту ІЕС 61850, на сьогоднішній день він не знайшов свого належного застосування в розподільчих мережах середньої напруги як в Україні, так і в закордонних компаніях.

Так, на найбільшому і провідному ринку автоматизації в електроенергетиці – в Китаї – до 2020 року було побудовано більше п'яти тисяч цифрових підстанцій, але всі вони представляють класи підстанцій високої і дуже високої напруги [13, 14].

Вирішення проблеми побудови економічних та ефективних систем релейного захисту та автоматики, систем автоматизації в електроенергетиці, а також цифровізації розподільчих мереж середньої напруги лежить в площині пропонованої нами системи централізованого управління розподільчими пристроями середньої напруги з адаптивним алгоритмом релейного захисту та автоматики [15,16].

Дослідження методів створення систем централізованого релейного захисту та автоматики. Важливою частиною робіт у напрямку створення «цифрових підстанцій» є централізована система релейного захисту та автоматики. Одними з основних питань, які необхідно розглянути для створення централізованої системи релейного захисту та автоматики, є:

- Забезпечення надійності роботи централізованого пристрою при зупинках і відмовах обладнання та каналів зв'язку, зокрема за рахунок дублювання.
 - Дослідження складу та структури централізованої системи.
- Для досягнення цих цілей пропонується перенести логіку релейного захисту та автоматики на центральний сервер, а логіку МУ (merging unit) залишити на вихідних лініях:
- Оцифрування аналогових сигналів (блоки ФНЧ, АЦП).
 - Керування перемикачами (логічні виходи).
 - Інтерфейс (з'єднання з сервером).

Це відповідає блок-схемі, зображеній на рис. 1. У цій централізованій системі вся логіка захисту і автоматики зосереджена в одному пристрої – сервері; важливу роль відіграє лінія зв'язку сервера з розподільником, з його блоками. Важлива роль ліній

зв'язку проявляється в тому, що цифрова лінія зв'язку повинна забезпечувати необхідну швидкість, надійність лінії зв'язку впливає на загальну надійність системи з центральним сервером; надійність лінії зв'язку впливає на загальну надійність системи з центральним сервером.

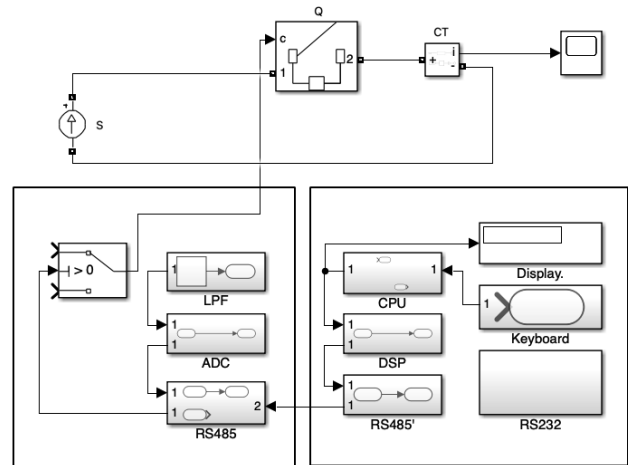


Рисунок 1 – Структурна схема централізованої системи релейного захисту та автоматики:

LPF – фільтр нижніх частот,
ADC – аналого-цифровий перетворювач (АЦП),
RS485 – інтерфейс RS-485,
DSP – цифровий сигнальний процесор,
CPU – центральний процесор

Front-End-Controller (Front End Processor, FEC, FEP) (два робочих і один резервний) – це два контролери, які використовуються в якості центрального сервера.

FEC є основою систем дистанційного керування, систем автоматизації та диспетчерського управління в енергетиці. Додатковий (другий) FEC може працювати в резервному режимі, або може бути налаштований як основний FEC разом з першим, або в програмному режимі «гарячого» резервування, а може бути налаштований як резервний FEC. При цьому підвищується надійність і доступність процесів моніторингу та управління. Це дозволяє змінювати технологічний процес на FEC без переривання керування процесом.

Обидва FEC з'єднані периферійною шиною. Але в останньому випадку тільки один FEC є активним (master) і має повний контроль над картами шини вводу/виводу, а другий FEC – гарячого резерву (slave) – постійно обмінюється інформацією про стан з активним FEC через послідовне або TCP/IP-з'єднання. Арбітр вибирає режим провідний/ведений, який може включити резерв, коли ведучий не функціонує належним чином.

У першому випадку може використовуватися принцип мажоритарної системи, тобто коли факт настання події, що вимагає реакції з боку системи захисту і управління, виявляється шляхом «голосування», і обидві FEC приймають рішення про подальші дії при формуванні або неформуванні двох однакових команд.

Необхідно враховувати відносну надійність комплексу мікропроцесорних терміналів релейного захисту та автоматики і FEC при паралельній конфігурації, коли від однієї шини відходить декілька ліній і кожна лінія захищається одним терміналом. Найпростіша підстанція показана на рис 2. Об'єкти захисту з терміналами захисту (Q) захищають лінію електропередач (P).

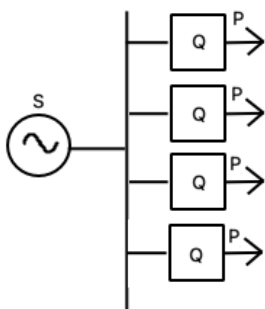


Рисунок 2 – Структурна схема централізованої системи релейного захисту та автоматики:

S – енергосистема,
Q – термінал лінійного захисту,
P – лінія електропередачі

Щоб мати можливість порівняти дві конфігурації, зробимо припущення: ймовірність виходу з ладу терміналів мікропроцесора P і терміналів FEC однакова. Нам також потрібно ввести ймовірність пошкодження X (наприклад, короткого замикання) на лінії живлення. Для паралельної схеми це буде ймовірність пошкодження P ліній, з Q захистами.

При порівнянні терміналів і сервера застосовується наступний метод: ми вибираємо ймовірності, лінійні по X (в цьому випадку ми вважаємо, що $X \ll 1$), тоді при порівнянні двох систем ми можемо ігнорувати X (відрізати).

Ймовірність відмови захисту від пошкоджень в лінії становить [17]:

$$P \cdot X \quad (1)$$

відповідно, ймовірність того, що відмова лінії захисту не призведе до відмови всієї лінії дорівнює:

$$(1 - P_{(\cdot)X}). \quad (2)$$

Оскільки всі P ліній незалежні, то ймовірність того, що відмова жодної з n ліній захисту не призведе до відмови всього захисту, дорівнює:

$$(1 - P_{(\cdot)X})^n. \quad (3)$$

Таким чином, ми отримуємо ймовірність відмови Y для всього захисту:

$$Y = 1 - (1 - P_{(\cdot)X})^n. \quad (4)$$

Лінійна частина:

$$Y = n_{(\cdot)P(\cdot)X} \quad (5)$$

відповідно:

$$Y \sim n \cdot P. \quad (6)$$

Для цієї схеми n буде рівним 4.

Крім виходу з ладу клеми, можливе помилкове спрацювання клеми (і FEC), коли за відсутності пошкоджень на лінії, клема подає команду на вимикач. Назвемо ймовірність такої події Z за умови, що всі чотири клеми підключені однаково. Тоді для чотирьох терміналів сумарна ймовірність хибної тривоги дорівнює [17]:

$$(1 - (1 - Z)^4) = 4Z - 6Z^2 + 4Z^3 - Z^4. \quad (7)$$

Для двох FEC (у випадку однієї робочої та однієї резервної) пристрій контролю працездатності FEC реагує тільки на наявність певних сигналів від FEC (наприклад, сигналів опитування Ofsted), якщо вони не надходять протягом деякого часу – основна FEC зупиняється, починає роботу резервна FEC. Це буде відбуватися тільки в певних випадках виходу з ладу основної FEC:

- Втрата живлення FEC.
- Вихід з ладу логічної схеми FEC (наприклад: вихід з ладу центрального процесора).

При цьому не будуть виявлені складні типи несправностей, такі як:

- Неправильна логіка роботи FEC (наприклад, опитування Ofsted триває, але логіка захисту не працює).
- Неправильна логіка роботи захисту.

Слід зазначити, що резервування за допомогою трьох і більше FEC в гарячому резерві (коли всі три FEC працюють паралельно і працює більшість системи) дозволяє виявляти і складні види відмов (коли один з FEC не буде працювати як інший FEC), але ці варіанти є більш дорогими і можуть бути економічно доцільними для розподільчих центрів і підстанцій середньої напруги.

Питання надійності в розподільчих центрах та підстанціях середньої напруги можна вирішувати поетапно, збільшуючи складність системи:

- Один FEC.
- Два паралельних (з резервуванням або дублюванням) FEC.

Важливим фактором у системі захисту є використання вищих (вище першої гармоніки 50 Гц) гармонік. В основному, вищі гармоніки використовуються для визначення несправного фідера в мережі з ізолюваною нейтраллю: абсолютне значення струму вищих гармонік у пошкодженному фідері буде більшим, ніж у неушкоджених фідерах.

Важливим фактором захисту системи є використання найвищої (вище першої гармоніки 50 Гц) гармоніки захисту. В основному, вищі гармоніки використовуються для визначення несправного фідера в мережі з ізолюваною нейтраллю: абсолютне

значення струму вищих гармонік у пошкодженому фідері буде більшим, ніж у непошкоджених фідерах.

Оскільки існують й інші методи визначення пошкодження фідера (наприклад, у пошкодженому фідері амплітуда струмів нульової послідовності буде найбільшою), використання гармонік (і співвідношення фаз) також може здійснюватися поетапно:

- Визначення амплітуди синусоїдальних сигналів за значеннями струмів (без фази синусоїдальних сигналів, без гармонік).
- Визначення амплітуди та фази синусоїдальних сигналів за допомогою перетворення Фур'є (реєстрація фази синусоїдальних сигналів з урахуванням гармонік).

В результаті заплановано три етапи:

- Виділення FEC, метод поточного значення.
- Одинарний FEC, метод перетворення Фур'є.
- Два паралельно працюючих FEC, метод перетворення Фур'є.

Поетапна розробка системи дозволяє поступово набувати досвіду в проектуванні, виготовленні систем і це підвищує ймовірність успішного завершення проекту.

Крім того, три різні за складністю системи допоможуть нам сегментувати ринок: пропонувати різні (за складністю і вартістю) пристрої різним замовникам, відповідно до їх вимог до складу захисту, відповідно до їх вимог до систем надійності. Це охоплює широкий спектр ринку пристроїв захисту та автоматики.

Оціночні вимоги:

1. Єдиний FEC, метод поточного значення. Максимально дешевий варіант з мінімальними вимогами до надійності та структури захисту:

- а. Кількість точок дискретизації на період першої гармоніки 50 Гц – 12.
- б. Розрядність АЦП – 10.
- в. До складу MU (пристрій зв'язку з об'єктом, що знаходиться на кожному фідері) – логічні входи, виходи, 3 аналогових входи, АЦП, інтерфейс RS485 (2400 кбіт/с до 100 м, дві екрановані виті пари).
- г. До 30 MU. MU для сигналів струму, MU для сигналів напруги (до 2 штук).
- д. FEC: DSP (визначення амплітуд синусоїдальних сигналів, метод поточного значення), процесор логічного захисту і автоматики, 2 інтерфейси RS485 (підключення до БП, зв'язок з рівнем управління), інтерфейс RS232 (або USB) – зв'язок з комп'ютером для конфігурації FEC, лицьова панель.

2) Одинарний FEC, метод перетворення Фур'є. Варіант з мінімальними вимогами до надійності і високими вимогами до складу захистів:

- а. Кількість точок дискретизації в періоді першої гармоніки 50 Гц – 40.
- б. Розрядність АЦП – 12.
- в. До складу MU (виносний модуль, розташований на кожному фідері) – логічні входи, виходи, 3 аналогових входи, тактовий вхід (задає фазу напруги), АЦП, DSP (перетворення Фур'є, що визначає

амплітуду і фазу), інтерфейс RS485 (2400 кбіт/с до 100 м, дві екрановані виті пари).

г. До 30 MU. MU для сигналів струму, MU для сигналів напруги (до 2 штук).

д. FEC: процесор логічного захисту і автоматики, 2 інтерфейси RS485 (підключення до БП, зв'язок з рівнем управління), інтерфейс RS232 (або USB) – зв'язок з комп'ютером для конфігурації FEC, передня панель.

3) Два паралельно працюючих FEC, метод перетворення Фур'є. Варіант з підвищеними вимогами до надійності і підвищеними вимогами до складу захистів: кожен FEC пов'язаний з MU окремими лініями:

- а. Кількість точок вибірки в періоді першої гармоніки 50 Гц – 40.
- б. Розрядність АЦП – 12.
- в. До складу MU (виносний модуль, розташований на кожному фідері) – логічні входи, виходи, 3 аналогових входи, вхід синхронізованих сигналів (заданий сигнал часу), АЦП, ЦОС (перетворення Фур'є, визначення амплітуди і Ф-PS), 2 інтерфейси RS485 (2400 кбіт/с до 100 м, дві екрановані виті пари), вбудована система мажоритарного керування.

г. Визначення амплітуд синусоїдальних сигналів – в MU, метод перетворення Фур'є.

д. До 30 MU. MU для сигналів струму, MU для сигналів напруги (до 2 штук).

е. FEC: процесор логічного захисту та автоматики, 2 інтерфейси RS485 (зв'язок з БП, зв'язок з рівнем управління), інтерфейс RS232 (або USB) – зв'язок з комп'ютером для конфігурації FEC, лицьова панель.

Існує проблема низької швидкості передачі даних стандартного модуля через інтерфейс RS485. В результаті, при низькій швидкості, багато (до 30) модулів на спільній шині не зможуть встигати передавати інформацію.

В такому випадку необхідна топологія «зірка» для побудови мережі передачі даних: кожен MU підключається до сервера власною виділеною лінією. Зрозуміло, що таке рішення дорожче: більша довжина кабелю, більша кількість (32) інтерфейсів RS485 для FEC.

У цьому випадку, однак, ми отримуємо:

- Значний виграв у надійності ліній зв'язку: одна несправність лінії вплине лише на один модуль.
- Кожна лінія зв'язку інтерфейсу RS485 буде працювати з меншою швидкістю, що підвищує надійність зв'язку, знижує вартість MU, значно розширює номенклатуру промислових MU (за рахунок зниження вимог до них).

Розрахунок необхідної продуктивності (вимоги до швидкодії) центрального процесора пристрою захисту.

1) Одиночний FEC, метод поточного значення.

У цьому варіанті MU виробляє тільки оцифровку вхідного сигналу (кількість точок дискретизації на період першої гармоніки 50 Гц – 12; розрядність АЦП – 10). Таким чином, на єдиний FEC надходить «сирий», опціонально оброблений цифровий потік, що зменшує

максимальне значення MU (кількість яких може досягати 30, і величина яких суттєво впливає на вартість всього комплексу).

У випадку максимуму, при 30 MU ми отримуємо цифровий потік (без урахування накладних витрат), який є максимальним, порівняно з іншими варіантами:

$$12 \cdot 10 \cdot 30 \cdot 30 = 180000 \text{ біт/с} \quad (8)$$

При цьому максимальне навантаження йде на центральний процесор з визначенням амплітуди синусоїдального сигналу методом поточного значення, який розраховує середньоквадратичне значення за період першої гармоніки (серед 12 точок з 10-бітної розрядності). За час роботи захисту і контролю (час повного циклу перетворення, близько 10 мілісекунд) необхідно (для сигналів одиночних MU, в даному випадку відзначимо, що немає необхідності обчислювати квадратний корінь і ділити на кількість точок):

- 12 операцій множення.
- 11 операцій додавання.

За 30 MU отримуємо 360 множень, 330 операцій додавання. За одну секунду, відповідно, потрібно 36000 множень, 33000 операцій додавання. Якщо припустити, що для цілочисельного множення буде потрібно близько 10 операцій додавання, то мінімальна продуктивність процесора (тільки на визначенні амплітуди синусоїдального сигналу) порядку 400 тис. операцій додавання в секунду. У мережах середньої напруги використовуються прості максимальні і мінімальні захисти, проста логіка автоматики, які практично не створюють серйозного навантаження на центральний процесор. При цьому всі сервіси (обчислювальні), не пов'язані безпосередньо з роботою захистів і управління, лягають на спеціалізовані контролери і розвантажують, таким чином, центральний процесор:

- 2 інтерфейси RS485 (зв'язок з MU, зв'язок з рівнем управління).
- Інтерфейс RS232 (або USB) – для зв'язку з комп'ютером для налаштування FEC.
- Передня панель (алфавітно-цифровий дисплей, світлодіод).

2) Інше розташування опцій.

- Варіант з мінімальними вимогами до надійності і високими вимогами до складу захисту.
- Варіант з підвищеними вимогами до надійності та підвищеними вимогами до складу захистів: кожен FEC пов'язаний з MU окремими лініями.

Основне навантаження по визначенню амплітуди і фази синусоїдального сигналу припадає на FEC (на FEC передається інформація у вигляді амплітуди і фази сигналу).

Тому на FEC передаються тільки навантаження обробки логіки захисту і автоматики, які не створюють великого навантаження на центральний процесор (прості струмові захисти, проста логіка автоматики). [18–20].

Висновки. Сьогодні фінансові та часові витрати промислових підприємств і електромережових компаній на проектування, впровадження та обслуговування в розподільчих підстанціях середньої напруги традиційних систем релейного захисту та автоматики, систем автоматизації в електроенергетиці є неприйнятними. Більше того, незважаючи на велику кількість енергоблоків в енергосистемі, вони фактично позбавлені більшості інновацій у сфері автоматизації та «цифровізації», які в першу чергу визначені технологіями в частині міжнародного стандарту IEC 61850 «Цифрові підстанції та мережі».

Розроблюваний проект централізованої системи управління розподільчим пристроєм середньої напруги, основною частиною якої є централізована система релейного захисту та автоматики, дозволить вирішити більшість вищезазначених проблем шляхом ліквідації комплексу окремих мікропроцесорних терміналів релейного захисту та автоматики, який був розгорнутий на підстанціях збору та передачі інформації, включаючи комутаційне обладнання, та об'єднання всіх необхідних функцій в централізовану та багатоканальну систему, при цьому на єдиному обчислювальному вузлі застосовано два дубльованих або резервних центральних сервера – FEC/FEP.

Такий підхід вимагає вирішення проблеми забезпечення необхідної надійності системи релейного захисту та автоматики на електростанції середньої напруги та забезпечення необхідного складу і структури централізованої системи, в тому числі з урахуванням нормативних вимог у сфері релейного захисту та автоматики. Авторами виконано оцінку зміни ймовірності відмов та хибних спрацьовувань систем релейного захисту та автоматики за запропонованим підходом у порівнянні з традиційним, коли така система будується як сукупність окремих терміналів для кожного приєднання (комірки) розподільчого пристрою підстанції середньої напруги. В даному варіанті розглядаються два варіанти реалізації більшості систем, коли розглядається розгортання централізованої системи. Оцінка та аналіз показали, що найбільш надійним з точки зору ймовірності відмови всього захисту є варіант двох FEC з мажоритарною системою «1 з 2» (схема «АБО»). Найбільш надійним з точки зору ймовірності хибного спрацьовування системи є варіант двох FEC з мажоритарною системою «2 з 2» (схема «І»). Якщо не враховувати вплив ліній зв'язку, а також аналогових (вимірювальних) кіл на кожному приєднанні, то традиційний варіант побудови систем релейного захисту та автоматики з точки зору ймовірності відмови та хибного спрацьовування знаходиться між двома варіантами, незалежно від випадку, що розглядається. Варіант централізованої системи релейного захисту і автоматики при експлуатації одного об'єктового FEC, хоча і є економічним і цілком прийнятним з точки зору надійності, не дозволяє змінювати FEC без переривання технологічного процесу і є дуже вимогливим до продуктивності центрального процесора. Такий варіант можна розглядати як проміжний для накопичення досвіду

проектування і виготовлення централізованої системи, а також для використання на некритичних електроустановах споживачів.

Варіант централізованої системи з резервуванням одного FEC іншим FEC близький за надійністю до варіанту системи з одним централізованим FEC, оскільки у випадку хибних тривог, як і в більшості випадків відмов, ввімкнення резервного FEC не може відбутися. Таким чином, цей варіант корисний для порівняння з одним FEC лише з точки зору можливості заміни робочого FEC без переривання керування технологічним процесом. Продуктивність центрального сервера системи при будь-якому сценарії її побудови для розподільчої підстанції середньої напруги (до 30 приєднань) не перевищує продуктивності сучасних контролерів FEC/FER, і може бути легко досягнута з використанням контролерів SCADA, які представлені на ринку автоматизації в енергетиці.

Список літератури

1. Possibility of building a data-driven modern power systems / S. Shevchenko et al. *Scientific Papers of Donetsk National Technical University. Series: Electrical and Power Engineering*. 2022. No. 2(27). P. 5–9. DOI: <https://doi.org/10.31474/2074-2630-2022-2-5-9>.
2. ДСТУ ІЕС 61850-5:2019. Комунікаційні мережі та системи для автоматизації електроенергетичних підприємств. Частина 5. Технічні вимоги до функцій і моделей приладів (IEC 61850-5:2013, IDT). На заміну ДСТУ ІЕС 61850-5:2014; чинний від 2020-10-01. Вид. офіц.
3. Danylchenko D., Potryvai A., Tsiupa V. Implementation of digital remote line protection in Java language. *2023 IEEE 5th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES)*, Kremenchuk, Ukraine, 27–30 September 2023. DOI: <https://doi.org/10.1109/mees61502.2023.10402459>.
4. Loukkalahti M., Majer K., Valtari J. Experiences on the Kalasatama Digital Substation. *Protection, Automation&Control World Conference 2024 (PACW 2024)*, Athens, 17–20 June 2024.
5. Power quality impact and its assessment: A review and a survey of Lithuanian industrial companies / V. Liubčuk et al. *Inventions*. 2025. Vol. 10, no. 2. 30. DOI: <https://doi.org/10.3390/inventions10020030>.
6. Relay protection mirror operation technology based on digital twin / Z. Yao et al. *Protection and control of modern power systems*. 2023. Vol. 8, no. 1. 51. DOI: <https://doi.org/10.1186/s41601-023-00328-4>.
7. Radimov S. M., Plis V. P. Relay protection devices functionality comparative analysis. *Herald of Advanced Information Technology*. 2023. Vol. 6, no. 3. P. 227–239. DOI: <https://doi.org/10.15276/haite.06.2023.15>.
8. Данильченко Д. О., Потривай А. Е. Система динамічного прогнозування технічного стану обладнання Об'єднаної електроенергетичної системи. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність*. 2023. № 1 (6). С. 16–21. DOI: <https://doi.org/10.20998/2224-0349.2023.01.10>.
9. Digitalization of protection relay management / M. F. B. Hamdan et al. *2022 IEEE International Conference on Power and Energy (PECon)*, Langkawi, Kedah, Malaysia, 5–6 December 2022. P. 95–98. DOI: <https://doi.org/10.1109/pecon54459.2022.9988859>.
10. Черкашина В. В., Цюпа В. М. Аналіз алгоритмів роботи диференційного релейного захисту та їх моделювання у середовищі MATLAB. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність*. 2023. № 1 (6). С. 113–118. DOI: <https://doi.org/10.20998/2224-0349.2023.01.13>.
11. Modelling and analysing security threats targeting protective relay operations in digital substations / M. F. Elrawy et al. *2023 IEEE International Conference on Cyber Security and Resilience (CSR)*, Venice, Italy, 31 July – 2 August 2023. P. 523–529. DOI: <https://doi.org/10.1109/csr57506.2023.10224964>.
12. Danylchenko D., Tsiupa V., Mylko V. Digital implementation of relay protection algorithms. Transformer differential protection. *2023 IEEE 4th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, Kharkiv, Ukraine, 2–6 October 2023. DOI: <https://doi.org/10.1109/khpiweek61412.2023.10312912>.
13. Розробка моделей складних схем релейного захисту в програмному комплексі MATLAB / М. В. Петровський та ін. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність*. 2023. № 1 (6). С. 58–64. DOI: <https://doi.org/10.20998/2224-0349.2023.01.05>.
14. Danylchenko D., Potryvai A., Mazur M. System for Prediction of the Technical Condition of Electric Power Equipment. *2023 IEEE 4th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, Kharkiv, Ukraine, 2–6 October 2023. DOI: <https://doi.org/10.1109/khpiweek61412.2023.10312919>.
15. Cyberattacks on power systems / A. Presekal et al. *Smart Cyber-Physical Power Systems*. 2025. Vol. 1: Fundamental Concepts, Challenges, and Solutions. P. 365–403.
16. Розробка моделей струмових реле та реле напрямку потужності в програмному комплексі MATLAB / М. В. Петровський та ін. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність*. 2023. № 1 (6). С. 51–57. DOI: <https://doi.org/10.20998/2224-0349.2023.01.04>.
17. Operation monitoring platform of relay protection equipment at distribution network side under the background of new power system / Q. Li et al. *Energy Informatics*. 2024. Vol. 7, no. 1. 145. DOI: <https://doi.org/10.1186/s42162-024-00440-1>.
18. Моделювання напрямленого дистанційного захисту лінії електропередач в програмному комплексі PSCAD/EMTDC / В. В. Волохін та ін. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність*. 2016. № 3 (1175). С. 36–42.
19. Abilzhanova F., Bulatbaev F., Kuanyshbaeva A. Development of a method for reliability assessment of distribution power networks up to 110 kV. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2025. Vol. 1, no. 8 (133). P. 15–23. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.322920>.
20. Analysis of false data injection attacks against automated control for parallel generators in IEC 61850-based smart grid systems / M. M. Roomi et al. *IEEE Systems Journal*. 2023. Vol. 17, no. 3. P. 4603–4614. DOI: <https://doi.org/10.1109/jsyst.2023.3236951>.

References

1. S. Shevchenko, V. Tsiupa, D. Danylchenko, and A. Potryvai, “Possibility of building a data-driven modern power systems”, *Scientific Papers of Donetsk National Technical University. Series: Electrical and Power Engineering*, no. 2(27), pp. 5–9, Nov. 2022, doi: <https://doi.org/10.31474/2074-2630-2022-2-5-9>
2. *Communication Networks and Systems for Power Utility Automation. Part 5: Communication Requirements for Functions and Device Models (IEC 61850-5:2013IDT)*, DSTU IEC 61850-5:2019Tehnichnyi komitet standartyzatsii «Keruvannia enerhetychnymy systemamy ta poviazani z nym protsesy informatsiinoi vzaємodii» (TK 162) [Technical Committee for Standardisation “Energy Systems Management and Related Information Interaction Processes” (TC 162)]. (in Ukrainian)
3. D. Danylchenko, A. Potryvai, and V. Tsiupa, “Implementation of digital remote line protection in Java language”, in *2023 IEEE 5th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES)*, Kremenchuk, Ukraine, Sep. 27–30, 2023. IEEE, 2023, doi: <https://doi.org/10.1109/mees61502.2023.10402459>
4. M. Loukkalahti, K. Majer, and J. Valtari, “Experiences on the Kalasatama Digital Substation”, in *Protection, Automation&Control World Conference 2024 (PACW 2024)*, Athens, Greece, Jun. 17–20, 2024.
5. V. Liubčuk, V. Radziukynas, G. Kairaitis, and D. Naujokaitis, “Power quality impact and its assessment: A review and A survey of lithuanian industrial companies”, *Inventions*, vol. 10, no. 2, Apr. 2025, Art. no. 30, doi: <https://doi.org/10.3390/inventions10020030>
6. Z. Yao, D. Li, Z. Li, P. Zhou, and L. Li, “Relay protection mirror operation technology based on digital twin”, *Protection and Control of Modern Power Systems*, vol. 8, no. 1, Oct. 2023, Art. no. 51, doi: <https://doi.org/10.1186/s41601-023-00328-4>

7. S. M. Radimov and V. P. Plis, "Relay protection devices functionality comparative analysis", *Herald of Advanced Information Technology*, vol. 6, no. 3, pp. 227–239, Oct. 2023, doi: <https://doi.org/10.15276/hait.06.2023.15>
8. D. Danylchenko and A. Potryvai, "System for dynamic prediction of the technical condition of the equipment of a combined electric power system", *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Energy: Reliability and Energy Efficiency*, no. 1 (6), pp. 16–21, Jul. 2023, doi: <https://doi.org/10.20998/2224-0349.2023.01.10> (in Ukrainian)
9. M. F. B. Hamdan, W. U. Bt Wan Nowalid, M. T. B. Iskandar, A. F. B. M. Kamal, M. F. B. A. Rahman, and F. B. Shafe'i, "Digitalization of protection relay management", in *2022 IEEE International Conference on Power and Energy (PECon)*, Langkawi, Kedah, Malaysia, Dec. 5–6, 2022. IEEE, 2022, pp. 95–98, doi: <https://doi.org/10.1109/pecon54459.2022.9988859>
10. V. Cherkashyna and V. Tsyupa, "Analysis of differential relay protection algorithms and their modelling in MATLAB", *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Energy: Reliability and Energy Efficiency*, no. 1 (6), pp. 113–118, Jul. 2023, doi: <https://doi.org/10.20998/2224-0349.2023.01.13> (in Ukrainian)
11. M. F. Elraway, L. Hadjidemetriou, C. Laoudias, and M. K. Michael, "Modelling and analysing security threats targeting protective relay operations in digital substations", in *2023 IEEE International Conference on Cyber Security and Resilience (CSR)*, Venice, Italy, Jul. 31–Aug. 2, 2023. IEEE, 2023, pp. 523–529, doi: <https://doi.org/10.1109/csr57506.2023.10224964>
12. D. Danylchenko, V. Tsiupa, and V. Mylko, "Digital implementation of relay protection algorithms. Transformer differential protection", in *2023 IEEE 4th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, Kharkiv, Ukraine, Oct. 2–6, 2023. IEEE, 2023, doi: <https://doi.org/10.1109/khpiweek61412.2023.10312912>
13. M. V. Petrovskyi, I. O. Kramskyi, I. M. Diahovchenko, S. M. Lebedka, and I. I. Borzenkov, "Development of complex relay protection models in the MATLAB software", *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Energy: Reliability and Energy Efficiency*, no. 1 (6), pp. 58–64, Jul. 2023, doi: <https://doi.org/10.20998/2224-0349.2023.01.05> (in Ukrainian)
14. D. Danylchenko, A. Potryvai, and M. Mazur, "System for prediction of the technical condition of electric power equipment", in *2023 IEEE 4th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, Kharkiv, Ukraine, Oct. 2–6, 2023. IEEE, 2023, doi: <https://doi.org/10.1109/khpiweek61412.2023.10312919>
15. A. Presekal, V. S. Rajkumar, A. Štefanov, K. Pan, and P. Palensky, "Cyberattacks on power systems", in *Smart Cyber-Physical Power Systems, vol. 1, Fundamental Concepts, Challenges, and Solutions*. Wiley-IEEE Press, 2025, pp. 365–403.
16. M. V. Petrovskyi, I. O. Kramskyi, I. M. Diahovchenko, S. M. Lebedka, and I. I. Borzenkov, "Development of models of current relays and power direction relays in the MATLAB software", *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Energy: Reliability and Energy Efficiency*, no. 1 (6), pp. 51–57, Jul. 2023, doi: <https://doi.org/10.20998/2224-0349.2023.01.04> (in Ukrainian)
17. Q. Li, Y. Zhang, Z. Zhang, and Z. Li, "Operation monitoring platform of relay protection equipment at distribution network side under the background of new power system", *Energy Informatics*, vol. 7, no. 1, Dec. 2024, Art. no. 145, doi: <https://doi.org/10.1186/s42162-024-00440-1>
18. V. V. Volokhin, M. V. Petrovskyi, S. Yu. Shevchenko, O. O. Ivanov, and O. I. Ihnatova, "Modeliuvannia napriamlenoho dystantsiinoho zakhystu linii elektropredach v prohramnomu kompleksi PSCAD\EMTDC [Modelling of directional remote protection of power lines in the PSCAD\EMTDC software package]", *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Energy: Reliability and Energy Efficiency*, no. 3 (1175), pp. 36–42, 2016. (in Ukrainian)
19. F. Abilzhanova, F. Bulatbaev, and A. Kuanyshbaeva, "Development of a method for reliability assessment of distribution power networks up to 110 kV", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 1, no. 8 (133), pp. 15–23, Feb. 2025, doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.322920>
20. M. M. Roomi, S. M. S. Hussain, D. Mashima, C. Chang, and T. S. Ustun, "Analysis of false data injection attacks against automated control for parallel generators in IEC 61850-based smart grid systems", *IEEE Systems Journal*, vol. 17, no. 3, pp. 4603–4614, Feb. 2023, doi: <https://doi.org/10.1109/jsyst.2023.3236951>

Надійшла (received) 23.06.2025

UDC 621.316.925

DMYTRO DANYLCHENKO – Candidate of Technical Sciences (PhD), Docent, Senior Researcher, Professor of the Department of Electric Power Transmission, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"; Kharkiv, Ukraine. Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7912-1849>; e-mail: dmytro.danylchenko@khi.edu.ua

VLADYSLAV TSYUPA ✉ – Postgraduate Student of the Department of Electric Power Transmission, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"; Kharkiv, Ukraine. Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4269-1941>; e-mail: vladyslav.tsiupa@ieec.khi.edu.ua

METHOD OF IMPLEMENTING DIGITISATION OF RELAY PROTECTION AND AUTOMATION FOR POWER DISTRIBUTION FACILITIES WITH A VOLTAGE OF 6-10 KV

The paper presents a new concept for designing a centralized multi-channel control system for medium-voltage switchgear, the main innovation of which is the integration of primary and backup relay protection algorithms into the substation's computing infrastructure, namely, into a backup or redundant server unit known as the Front-End Controller. This architecture is aimed at improving the cost-effectiveness and practical operation of relay protection and automation solutions for energy companies and grid operators. The proposed approach is particularly applicable to the most common types of medium-voltage distribution networks, as well as to power supply systems at industrial enterprises. By moving the protection logic from distributed hardware relays to a central computing node, the system provides a more flexible implementation of modern adaptive relay protection and automation algorithms, which facilitates their integration into modern energy infrastructure. In addition, this solution promotes the implementation of IEC 61850-compliant technologies, ensuring interoperability and standardization between automation systems. The paper presents a detailed evaluation of the reliability and performance characteristics of the proposed centralized relay protection and automation system, which is designed to perform all the main protection functions of medium-voltage switchgear, including line and busbar protection. In addition, the paper describes the architecture of the control system, characterizes its main components, and evaluates the performance of the central controller. It is shown that the computational requirements of such a controller for a typical medium-voltage distribution substation remain within the performance range of modern SCADA-compatible controllers supplied by leading manufacturers of automation in the electric power sector. The results emphasize the feasibility of moving to centralized protection architectures without compromising the functional integrity or responsiveness of the system.

Keywords: relay protection and automation, automated process control systems, substation protection, improving the reliability of the power system, transients, adaptation algorithms, smart grids.

ДОРОШЕНКО ДМИТРО ВОЛОДИМИРОВИЧ ✉ – здобувач кафедри передачі електричної енергії, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; e-mail: ddorosenko55@gmail.com.

ПРОГНОЗУВАННЯ ВИКИДІВ ДІОКСИДУ ВУГЛЕЦЮ (CO_2) З ГАЗОТУРБІННИХ УСТАНОВОК ЗА ДОПОМОГОЮ МОДЕЛЕЙ МАШИННОГО НАВЧАННЯ

У роботі розглядається застосування методів машинного навчання, зокрема моделей XGBoost та Random Forest, для прогнозування рівня викидів вуглецю оксиду (CO_2) з газотурбінного обладнання. Точне передбачення рівня шкідливих викидів є критично важливим завданням у контексті забезпечення енергетичної безпеки та досягнення екологічної стійкості. У дослідженні використано реальний набір даних, зібраний у Туреччині упродовж 2011–2015 років, що містить понад 36 тисяч записів щогодинного моніторингу технічних та атмосферних параметрів газотурбінної установки. З метою покращення якості моделювання було проведено попередню обробку даних, що включала очищення, аналіз кореляції ознак та стандартизацію числових значень. На основі обраних параметрів побудовано дві регресійні моделі: XGBRegressor та RandomForestRegressor, які продемонстрували високу точність при оцінюванні результатів. Найкраще значення коефіцієнта детермінації склало 0,742 для моделі Random Forest, що вказує на її ефективність у відтворенні залежностей між технічними параметрами установки та рівнем викидів CO_2 . Аналіз важливості ознак показав, що найбільший вплив на рівень емісій мають параметри, пов'язані з температурними режимами турбіни, тоді як зовнішні атмосферні умови відіграють другорядну роль. Отримані результати мають практичне значення для енергетичної галузі, оскільки можуть бути використані для моніторингу викидів, планування модернізації енергетичних об'єктів, обґрунтування екологічної політики та вибору оптимальних режимів експлуатації устаткування. Впровадження подібних моделей у промислову практику сприятиме зменшенню викидів парникових газів, підвищенню ефективності енергоспоживання та реалізації національних стратегій сталого розвитку. Дослідження підтверджує, що застосування сучасних аналітичних інструментів на основі машинного навчання може зробити вагомий внесок у забезпечення екологічної та енергетичної безпеки країни.

Ключові слова: прогнозування викидів CO_2 ; енергетична безпека; машинне навчання; Random Forest; XGBoost; регресійна модель; газотурбінна установка; стандартизація даних.

Вступ. Зменшення викидів парникових газів, зокрема CO_2 , є ключовим завданням для сталого розвитку і енергетичної безпеки. CO_2 – це основний парниковий газ, що спричиняє глобальне потепління; тому точне прогнозування його емісій допомагає планувати заходи з їх скорочення і розвитку «зеленої» енергетики. З іншого боку, зниження викидів CO_2 пов'язане з диверсифікацією енергетичних ресурсів і зменшенням залежності від імпорту викопного палива, що підвищує енергетичну безпеку країни.

Газотурбінні установки широко використовуються в електроенергетиці завдяки своїй високій ефективності (до 60 % у комбінованому циклі) та здатності швидко реагувати на зміни попиту, що робить їх ідеальними для балансування навантаження в умовах нестабільності відновлюваних джерел енергії.

Двигун силової установки (газова турбіна) в основному використовується для вироблення електроенергії. Крім того, порівняно з вугільними ТЕС такі установки сприяють значному зниженню викидів – до 65 % меншого обсягу CO_2 на одиницю виробленої електроенергії [1, 2].

Мета статті. Метою даної роботи є розробка та оцінка регресійних моделей машинного навчання (моделей Random Forest та XGBoost) для прогнозування викидів (вуглецю оксиду) з турбінних установок на основі набору даних, а також аналіз отриманих результатів з погляду їх значущості для енергетичної безпеки.

Літературний огляд. Питання прогнозування викидів CO_2 є надзвичайно важливим з огляду на зміну клімату та екологічне регулювання, тому застосовуються різні методи машинного навчання. Так, у дослідженні Mădălina Maria Muraru та ін. (2025)

проаналізували автопарки понад 26 500 транспортних засобів, порівнявши Random Forest, XGBoost і нейронні мережі, і встановили, що Random Forest забезпечує найкращу точність CO_2 -прогнозів [3]. У дослідженні Jabeur та ін. (2024) виявили, що ансамблеві моделі, зокрема Random Forest і XGBoost, значно перевершують традиційні регресійні підходи при моделюванні екологічних викидів [4]. У роботі Hou & Liu (2024), яка використовує XGBoost із байєсівською оптимізацією (BO-XGBoost) для прогнозування викидів CO_2 у будівельній галузі Китаю, досягли високих результатів, підкресливши ефективність підходу [5]. Аналогічно Finger's група зафіксувала, що підтримка RF для селекції ознак плюс BO-XGBoost дуже точно прогнозує рівні парникових газів у розвинених і країнах, що розвиваються [6]. Нарешті, дослідження на сміттєспалювальному заводі показало, що як RF, так і XGBoost успішно моделюють концентрацію CO_2 , використовуючи понад 20 вхідних параметрів [7].

Многу обрані Random Forest та XGBoost через їхню високу точність та стійкість: RF ефективно справляється із зашумленими та категорійними даними, а XGBoost із регуляризацією й жорстким ансамблем демонструє найкращі результати в багатьох дослідженнях.

Теоретичні основи. Регресія – це підхід у машинному навчанні для прогнозування неперервних числових значень на основі вхідних ознак. На відміну від класифікації, яка відносить об'єкт до одного з дискретних класів, регресійні моделі виводять числові прогнози (наприклад, концентрацію забруднювача) на основі історичних даних. У сучасних рішеннях часто використовують ансамблеві методи на основі дерев

© Д. В. Дорошенко, 20xx



Ця робота ліцензується відповідно до **Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)**
Конфлікт інтересів: Автор заявив про відсутність конфлікту

рішень, які поєднують результати багатьох слабких моделей для отримання стійкішого прогнозу.

Випадковий ліс (Random Forest) – це широко розповсюджений ансамблевий алгоритм, який будується на основі поєднання багатьох незалежних дерев рішень. Кожне дерево навчається на випадковій вибірці даних і випадковому піднаборі ознак. Остаточний прогноз отримується шляхом усереднення прогнозів усіх дерев. Такий підхід знижує ризик перенавчання і дає більш надійні прогнози. Random Forest добре працює як для задач класифікації, так і регресії. Окрім високої точності, одним із важливих плюсів Random Forest є те, що він може оцінювати відносну важливість ознак у моделі. У контексті регресії алгоритм Random Forest агрегує результати дерев, що робить модель стійкою до шуму даних. У дослідженнях з прогнозування викидів вуглецю відзначено, що Random Forest дає зрозумілі результати і корисний для виявлення ключових факторів впливу на емісії [8–10]. Для задач регресії:

$$\hat{y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N f_i(x); \quad (1)$$

де $\hat{y}$ – фінальний прогноз моделі (середнє значення);
 N – кількість дерев у лісі;

$f_i(x)$ – прогноз i -го дерева для вхідного вектора x .

XGBoost (Extreme Gradient Boosting) – це ефективна реалізація градієнтного бустингу дерев рішень. Назва «Extreme Gradient Boosting» підкреслює приналежність моделі до сімейства градієнтних бустингових машин. Градієнтний бустинг – це послідовне побудова дерев, де кожне нове дерево навчається коригувати помилки попередніх. XGBoost оптимізовано для швидкого навчання на великих даних, має регуляризацию для контролю складності моделі і можливості обробки пропусків. Базовий принцип XGBoost можна коротко сформулювати як мінімізацію цільової функції, що включає функцію втрат і регуляризацийний член:

$$\mathcal{L}^{(t)} = \sum_{i=1}^N l(y_i, \hat{y}_i^{(t-1)} + f_t(x_i)) + \Omega(f_t); \quad (2)$$

де l – функція втрат;

$\hat{y}_i^{(t-1)}$ – прогноз моделі після $t-1$ кроків;

$f_i(x)$ – прогноз i -го дерева для вхідного вектора x ;

$f_t(x_i)$ – прогноз нового дерева;

$\Omega(f_t)$ – регуляризацийний термін, який контролює складність дерева.

Регуляризацийна функція має вигляд:

$$\Omega(f) = \gamma T + \frac{1}{2} \lambda \sum_{j=1}^T w_j^2 \quad (2)$$

де T – кількість листків дерева;

w_j – ваги в листках;

γ – штраф за кількість листків (L0-регуляризація);

λ – коефіцієнт L2-регуляризації.

Базовий принцип XGBoost можна коротко сформулювати так: модель мінімізує функцію якості (наприклад, MSE для регресії) плюс регуляризацийний штраф за складність дерев. XGBoost широко застосовується для прогнозування часових рядів і емісій, оскільки він здатний захоплювати нелінійні залежності та взаємодію ознак. У численних дослідженнях XGBoost демонстрував високу точність прогнозів CO₂ та інших забруднювачів – він часто перевершує інші моделі з погляду помилки прогнозу. Водночас XGBoost потребує налаштування гіперпараметрів та більших обчислювальних ресурсів [11–13].

Обидва підходи – Random Forest і XGBoost – належать до ансамблевих дерев'яних методів. Random Forest використовує «випадковий підсув» (bagging) даних і ознак для побудови незалежних дерев, у той час як XGBoost поєднує (сумує) багато дерев послідовно, кожне з яких вчиться покращувати похибку попереднього. Обидва алгоритми добре справляються з багатовимірними вхідними даними і здатні моделювати складні, нелінійні закономірності, що є ключовим при аналізі викидів залежно від різних факторів.

Опис даних та їх підготовка. Для реалізації задач прогнозування викидів оксиду вуглецю, що є індикатором рівня емісій CO₂ у процесах спалювання палива, у роботі було використано реальний набір даних із відкритого джерела – Gas Turbine CO and NO_x Emission Dataset з репозиторію машинного навчання UCI [14]. Цей датасет широко застосовується в дослідженнях, присвячених екологічному моніторингу, енергетичному моделюванню та аналізу експлуатаційних режимів промислових турбін. Дані були зібрані в рамках щогодинного моніторингу роботи газотурбінної електростанції в Туреччині в період з 2011 по 2015 роки, що забезпечує достатній часовий горизонт для формування надійних прогнозних моделей. Загальний обсяг даних становить 36733 спостереження. Кожен запис містить 11 числових ознак, що описують як внутрішні параметри турбінного агрегату, так і зовнішні атмосферні умови. До ключових змінних відносяться:

1. AP – зовнішній тиск повітря (мбар).
2. AH – відносна вологість повітря (%).
3. AFDP (Air Filter Difference Pressure) – різниця тиску на повітряному фільтрі (мбар).
4. GTER (Gas Turbine Exhaust Pressure) – тиск на виході турбіни (мбар).
5. TIT (Turbine Inlet Temperature) – температура на вході в турбіну (°C).
6. TAT (Turbine After Temperature) – температура на виході з турбіни (°C).
7. TEY (Turbine Energy Yield) – енергетичний вихід турбіни (МВт·ч).
8. CDP (Compressor Discharge Pressure) – тиск у компресорі на виході (мбар).
9. CO – концентрація оксиду вуглецю у викидах (мг/м³).

Попередній аналіз даних включав перевірку на пропущені значення, які були відсутні, що дало змогу

використовувати повну вибірку без додаткових процедур заповнення. Для зменшення ризику перенавчання та покращення якості моделей було проведено аналіз кореляції між ознаками та цільовою змінною CO₂ (рис. 1). Ознаки з низьким рівнем кореляції, такі як АН, ТАТ та АР, були виключені з подальшого аналізу.

Оскільки вхідні параметри мають різні фізичні одиниці вимірювання та варіації масштабів, було застосовано стандартизацію даних методом Z-перетворення (StandardScaler) [15], що дозволяє кожній ознаці мати середнє значення, близьке до нуля, та стандартне відхилення, близьке до одиниці.

Це забезпечує рівнозначний внесок кожної змінної у навчання моделей машинного навчання та запобігає домінуванню ознак з великими числовими значеннями, тому стандартизуємо кожне значення за формулою:

$$z = \frac{x - \mu}{\sigma} \quad (3)$$

де x – значення ознаки, що стандартизується;

μ – середнє значення ознаки в навчальному наборі;

σ – стандартне відхилення ознаки в навчальному наборі.

Результатом цієї процедури є рис. 2, в якій усі ознаки мають нульове середнє значення та стандартне відхилення, близьке до одиниці. Такий підхід покращує збіжність алгоритмів градієнтної оптимізації та забезпечує рівний вплив усіх параметрів на функцію втрат моделі.

Далі проведено розподіл підготовлених даних на навчальну та тестову вибірки у співвідношенні 80:20.

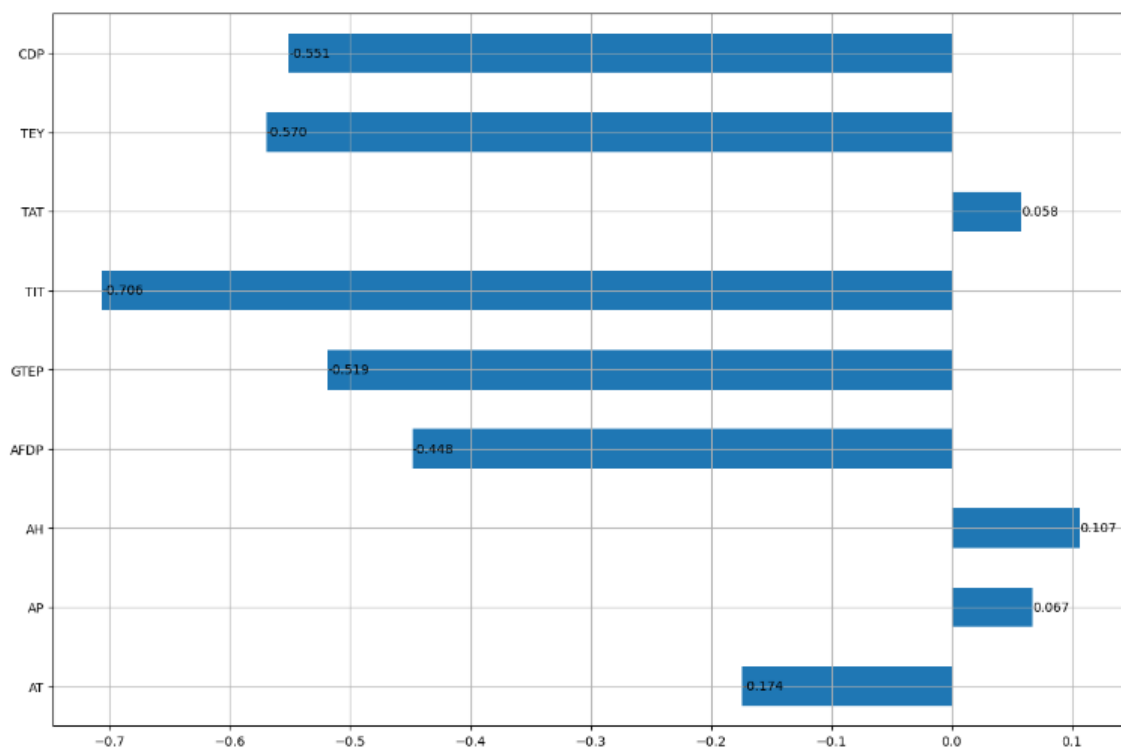


Рисунок 1 – Діаграма кореляції параметрів з CO₂

	AT	AFDP	GTEP	TIT	TEY	CDP
count	3.673300e+04	3.673300e+04	3.673300e+04	3.673300e+04	3.673300e+04	3.673300e+04
mean	-1.176081e-16	-1.015144e-15	5.292366e-16	9.609823e-15	9.888369e-16	-4.704326e-16
std	1.000014e+00	1.000014e+00	1.000014e+00	1.000014e+00	1.000014e+00	1.000014e+00
min	-3.215577e+00	-2.375059e+00	-1.874640e+00	-4.597825e+00	-2.144032e+00	-2.028623e+00
25%	-7.964882e-01	-7.363991e-01	-5.802810e-01	-5.490425e-01	-5.798539e-01	-5.745191e-01
50%	1.185304e-02	1.574091e-02	-1.095835e-01	2.550115e-01	1.431620e-02	-8.773591e-02
75%	7.992472e-01	5.832377e-01	8.334799e-01	8.879903e-01	6.769952e-01	7.296924e-01
max	2.603647e+00	4.761549e+00	3.611191e+00	1.110388e+00	2.944830e+00	2.845821e+00

Рисунок 2 – Застосування StandardScaler та описова статистика даних

Це класичний підхід, який дозволяє навчити модель на більшості даних, а потім оцінити її узагальнюючу здатність на нових, ще не бачених прикладах. Додатково, у ході тренування моделей була використана стратегія фіксованого генератора випадкових чисел (`random_state=42`), що гарантує відтворюваність результатів і дозволяє об'єктивно порівнювати моделі між собою. Усі кроки обробки даних реалізовані з використанням мови програмування Python та бібліотек `pandas` (для обробки таблиць), `matplotlib` (для побудови графіків), `seaborn` (для візуалізації кореляцій), `scikit-learn` (для масштабування та поділу даних), а також `xgboost` і `sklearn.ensemble` для побудови моделей. Загалом, підготовка даних здійснювалась з урахуванням принципів чистоти даних, оптимізації вхідного простору та забезпечення стійкості моделі до варіацій вхідних ознак, що є фундаментом для подальшого ефективного навчання регресійних моделей XGBoost та Random Forest.

Побудова моделей і обробка результатів. XGBoost (Extreme Gradient Boosting) реалізує принцип градієнтного бустингу, за якого кожне наступне дерево коригує помилки попередніх. Для забезпечення оптимального балансу між точністю та стійкістю моделі до перенавчання були підібрані такі основні гіперпараметри:

- `n_estimators = 480` – кількість дерев у ансамблі;
- `learning_rate = 0,1` – темп навчання (менші значення потребують більше дерев, але підвищують узагальнення);
- `max_depth = 3` – обмеження глибини дерев для уникнення перенавчання;
- `min_child_weight = 1` – мінімальна сума ваг у дочірньому вузлі;
- `gamma = 1` – мінімальне зменшення функції втрат для розділення вузлів;
- `subsample = 0,8` та `colsample_bytree = 0,8` – параметри випадкового вибору даних і ознак;
- `objective = 'reg:squarederror'` – цільова функція для регресії;

- `reg_alpha = 1` та `reg_lambda = 1` – L1- і L2-регуляризація відповідно;
- `random_state = 42` – фіксований генератор випадкових чисел для відтворюваності.

Модель була навчена на 80 % даних, а решта 20 % використана для тестування. Оцінка точності моделі здійснювалась за допомогою коефіцієнта детермінації (R^2) [16], який визначає частку варіації цільової змінної, поясненої моделлю:

$$R^2 = \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2} \quad (4)$$

де y_i – фактичне значення;

$\hat{y}_i$ – середнє значення ознаки в навчальному наборі;

$\bar{y}$ – середнє фактичних значень.

Результати розрахунку коефіцієнта детермінації для обох моделей наведені у табл. 1. Результат моделі XGBoost Regressor на тестовій вибірці становив $R^2 = 0,735$, що свідчить про здатність моделі пояснити приблизно 73,5 % варіації у викидах CO_2 . Візуальне порівняння прогнозованих та фактичних значень, представлене у вигляді лінійної діаграми, показало задовільну відповідність трендів, хоча деякі відхилення спостерігаються в пікових значеннях (рис. 3).

Таблиця 1 – Результати розрахунку коефіцієнта детермінації

Модель	R^2 (коефіцієнт детермінації)
XGBoost Regressor	0,735
Random Forest Regressor	0,742

Алгоритм Random Forest реалізує підхід *bagging*, формуючи велику кількість незалежних дерев рішень, побудованих на випадкових підмножинах даних і ознак. Остаточний прогноз є результатом усереднення передбачень усіх дерев. Було обрано такі параметри моделі:

- `n_estimators = 1000` – кількість дерев;
- `max_depth = 15` – максимальна глибина дерева;

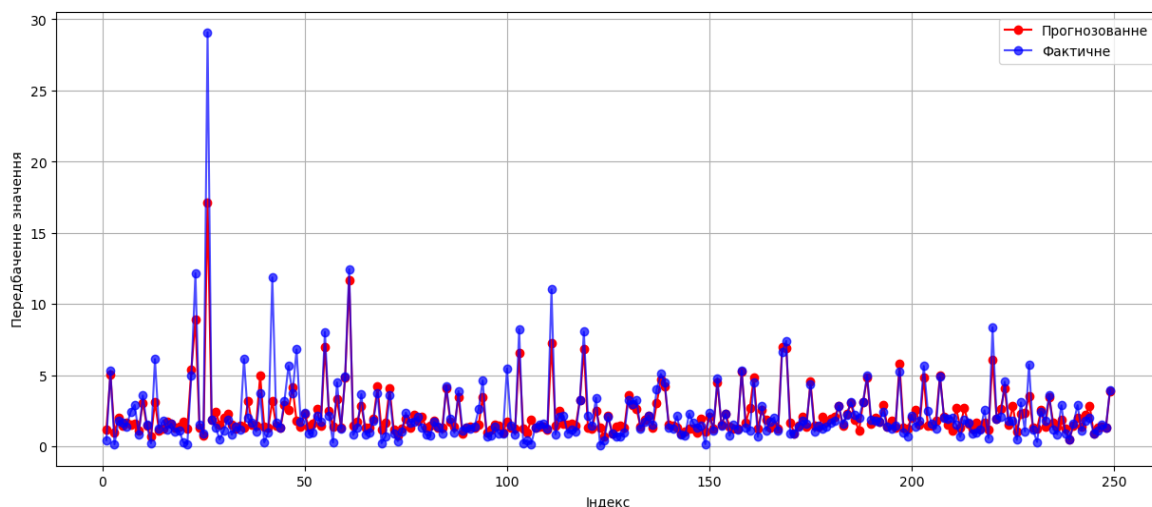


Рисунок 3 – Графік розсіювання передбачених значень для XGBRegressor

- `min_samples_split = 2` – мінімальна кількість зразків для поділу вузла;
- `min_samples_leaf = 1` – мінімальна кількість зразків у листі;
- `max_features = 'log2'` – кількість ознак для поділу;
- `bootstrap = True` – використання бутстреп-зразків;
- `n_jobs = -1` – використання всіх доступних процесорів;
- `random_state = 42`.

Після навчання модель Random Forest продемонструвала $R^2 = 0,742$, що є дещо вищим за показник XGBoost. Це свідчить про кращу здатність моделі відтворювати залежність між технічними параметрами турбіни та рівнем емісій CO₂. Візуалізація також підтвердила більш точне прилягання до фактичних значень у порівнянні з попередньою моделлю (рис. 4).

Висновки. Проведений аналіз продемонстрував, що методи машинного навчання на базі дерев (Random Forest та XGBoost) здатні точно моделювати залежність викидів окису вуглецю від змінних стану газотурбінних установок. Отримані моделі показали високе значення R^2 ($\approx 0,74$) і низьку помилку, що підтверджує їх придатність для задачі прогнозування викидів CO₂ (окису вуглецю). Найважливішими факторами виявилися внутрішні параметри турбіни (зокрема, температури TIT, TAT), а зовнішні умови відіграють другорядну роль. Це узгоджується з очікуваннями: параметри роботи агрегату безпосередньо визначають інтенсивність спалювання палива і утворення шкідливих речовин.

З точки зору енергетичної безпеки, прогнози викидів CO₂ важливі для планування енергетичної стратегії та екологічної політики. Такі моделі можуть допомогти оцінювати вплив різних режимів роботи обладнання чи заміни палива (наприклад, перехід від вугілля на газ) на сумарні викиди. Зменшення викидів вуглецю у енергетиці сприяє скороченню залежності від «брудних» видів палива і підвищенню

енергоефективності, що безпосередньо зміцнює енергетичну безпеку країни. Прогнозуючи майбутні рівні емісій, можна обґрунтовано планувати «зелену» модернізацію генерації, інвестувати в нові технології та оцінювати доцільність політичних рішень (наприклад, стимулювання ВДЕ або перехід на менш вуглецеве паливо) з урахуванням кліматичних цілей.

Отже, виконане дослідження демонструє ефективність регресійних моделей XGBoost і Random Forest для прогнозування викидів CO₂ у контексті енергетичної безпеки. Отримані результати можна використовувати для аналізу енергетичних систем і моніторингу викидів, що важливо для сталого розвитку енергетики і досягнення екологічних цілей.

Список літератури

1. Комітет Верховної Ради України з питань екологічної політики та природокористування. Інформаційно-аналітична записка щодо стану законодавства з питань зміни клімату та основних напрямків діяльності Верховної Ради України у цій сфері. 2020. 5 с. URL: <https://komekolog.rada.gov.ua/uploads/documents/35959.pdf>.
2. What is a gas turbine power station?. *Allied Power Group*. URL: <https://alliedpg.com/latest-articles/gas-turbine-power-station/>.
3. Muraru M. M., Simó Z., Iantovics L. B. Study on state-of-the-art machine learning algorithms efficiency for CO₂ emissions prediction in fleet management optimization. *The 18th International Conference Interdisciplinarity in Engineering (Inter-Eng 2024)*: Lecture Notes in Networks and Systems, vol. 1249, Targu Mures, Romania, 3–4 October 2024. Cham, 2025. P. 1–11. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-81685-7_1.
4. Han T. T. T., Lin C.-Y. Exploring long-run CO₂ emission patterns and the environmental kuznets curve with machine learning methods. *Innovation and green development*. 2025. Vol. 4, no. 1. 100195. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.igd.2024.100195>.
5. Hou Y., Liu S. Predictive modeling and validation of carbon emissions from China's coastal construction industry: a BO-XGBoost ensemble approach. *Sustainability*. 2024. Vol. 16, no. 10. 4215. DOI: <https://doi.org/10.3390/su16104215>.
6. Gan N., Zhao S. Global greenhouse gas reduction forecasting via machine learning model in the scenario of energy transition. *Journal of Environmental Management*. 2024. Vol. 371. 123309. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.123309>.
7. Machine learning-based prediction of the CO₂ concentration in the flue gas and carbon emissions from a waste incineration plant / Y. Ma et al. *ACS ES&T Engineering*. 2024. Vol. 4, no. 3. P. 737–747. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsestengg.3c00461>.

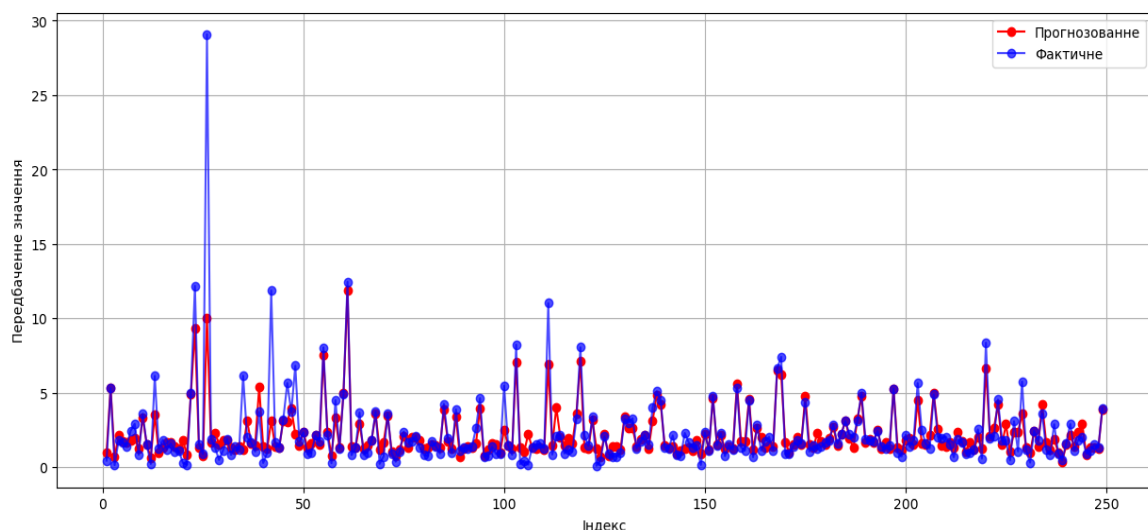


Рисунок 4 – Графік розсіювання передбачених значень для RandomForestRegressor

8. Biau G., Scornet E. A Random Forest guided tour. 2015. 42 p. (Preprint. arXiv:1511.05741). DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1511.05741>.
9. Random forest algorithm in machine learning. *GeeksforGeeks*. URL: <https://www.geeksforgeeks.org/random-forest-algorithm-in-machine-learning/>.
10. A comparison of random forest variable selection methods for classification prediction modeling / J. L. Speiser et al. *Expert Systems with Applications*. 2019. Vol. 134. P. 93–101. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2019.05.028>.
11. Chen T., Guestrin C. XGBoost: a scalable tree boosting system. 2016. 13 p. (Preprint. arXiv:1603.02754). DOI: <https://doi.org/10.1145/2939672.2939785>.
12. Brownlee J. XGBoost for regression. *Machine Learning Mastery*. URL: <https://machinelearningmastery.com/xgboost-for-regression/>.
13. Kavlakoglu E., Russi E. What is XGBoost?. *IBM - United States*. URL: <https://www.ibm.com/think/topics/xgboost>.
14. Kaya H., Tufekci P. Gas turbine CO and NOx emission data set. *UCI Machine Learning Repository*. DOI: <https://doi.org/10.24432/C5WC95>.
15. StandardScaler. *scikit-learn*. URL: <https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.preprocessing.StandardScaler.html>.
16. Turney S. Coefficient of Determination (R^2) | Calculation & Interpretation. *Scribbr*. URL: <https://www.scribbr.com/statistics/coefficient-of-determination/>.
- Eng 2024), Targu Mures, Romania, Oct. 3–4, 2024. Cham: Springer, 2025, pp. 1–11, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-031-81685-7_1
4. T. T. T. Han and C.-Y. Lin, “Exploring long-run CO₂ emission patterns and the environmental kuznets curve with machine learning methods”, *Innovation and Green Development*, vol. 4, no. 1, Feb. 2025, Art. no. 100195, doi: <https://doi.org/10.1016/j.igd.2024.100195>
5. Y. Hou and S. Liu, “Predictive modeling and validation of carbon emissions from China’s coastal construction industry: A BO-XGBoost ensemble approach”, *Sustainability*, vol. 16, no. 10, May 2024, Art. no. 4215, doi: <https://doi.org/10.3390/su16104215>
6. N. Gan and S. Zhao, “Global greenhouse gas reduction forecasting via machine learning model in the scenario of energy transition”, *Journal of Environmental Management*, vol. 371, Dec. 2024, Art. no. 123309, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.123309>
7. Y. Ma et al., “Machine learning-based prediction of the CO₂ concentration in the flue gas and carbon emissions from a waste incineration plant”, *ACS ES&T Engineering*, vol. 4, no. 3, pp. 737–747, Jan. 2024, doi: <https://doi.org/10.1021/acsestengg.3c00461>
8. G. Biau and E. Scornet, *A Random Forest Guided Tour*. To be published, doi: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1511.05741>
9. “Random forest algorithm in machine learning.” *GeeksforGeeks*. [Online]. Available: <https://www.geeksforgeeks.org/random-forest-algorithm-in-machine-learning/>
10. J. L. Speiser, M. E. Miller, J. Tooze, and E. Ip, “A comparison of random forest variable selection methods for classification prediction modeling”, *Expert Systems With Applications*, vol. 134, pp. 93–101, Nov. 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2019.05.028>
11. T. Chen and C. Guestrin, *XGBoost: A Scalable Tree Boosting System*. To be published, doi: <https://doi.org/10.1145/2939672.2939785>
12. J. Brownlee. “XGBoost for regression.” *Machine Learning Mastery*. [Online]. Available: <https://machinelearningmastery.com/xgboost-for-regression/>
13. E. Kavlakoglu and E. Russi. “What is XGBoost?” *IBM - United States*. [Online]. Available: <https://www.ibm.com/think/topics/xgboost>
14. H. Kaya and P. Tufekci. “Gas turbine CO and nox emission data set.” *UCI Machine Learning Repository*, doi: <https://doi.org/10.24432/C5WC95>
15. “StandardScaler.” *scikit-learn*. [Online]. Available: <https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.preprocessing.StandardScaler.html>
16. S. Turney. “Coefficient of Determination (R^2) | Calculation & Interpretation.” *Scribbr*. [Online]. Available: <https://www.scribbr.com/statistics/coefficient-of-determination/>

References

1. Committee of the Verkhovna Rada of Ukraine on Environmental Policy and Nature Management, “Informatsiino-analitychna zapyska shchodo stanu zakonodavstva z pytan zminy klimatu ta osnovnykh napriamkiv diialnosti Verkhovnoi Rady Ukrainy u tsii sferi [Information and analytical note on the state of legislation on climate change and the main areas of activity of the Verkhovna Rada of Ukraine in this field]”, To the letter of the Institute of Legislation of the Verkhovna Rada of Ukraine dated 27 April 2020 No. 1-17, 22/1612020. [Online]. Available: <https://komekolog.rada.gov.ua/uploads/documents/35959.pdf> (in Ukrainian)
2. “What is a gas turbine power station?” Allied Power Group. [Online]. Available: <https://alliedpg.com/latest-articles/gas-turbine-power-station/>
3. M. M. Muraru, Z. Simó, and L. B. Iantovics, “Study on state-of-the-art machine learning algorithms efficiency for CO₂ emissions prediction in fleet management optimization”, in *The 18th International Conference Interdisciplinarity in Engineering (Inter-*

Надійшла (received) 14.06.2025

UDC 621.438:519.254

DOROSHENKO DMYTRO ✉ – Master Student of the Department of Electric Power Transmission, National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”; Kharkiv, Ukraine; e-mail: ddoroshenko55@gmail.com.

FORECASTING CARBON DIOXIDE (CO₂) EMISSIONS FROM GAS TURBINE PLANTS USING MACHINE LEARNING MODELS

This study explores the application of machine learning methods, specifically XGBoost and Random Forest models, for predicting carbon dioxide (CO₂) emissions from gas turbine equipment. Accurate forecasting of harmful emissions is a critical task in the context of ensuring energy security and achieving environmental sustainability. The research utilizes a real-world dataset collected in Turkey between 2011 and 2015, containing over 36,000 hourly monitoring records of technical and atmospheric parameters from a gas turbine installation. To enhance model performance, data preprocessing was conducted, including cleaning, feature correlation analysis, and standardization of numerical values. Based on the selected parameters, two regression models were developed: XGBRegressor and RandomForestRegressor, both demonstrating high accuracy in evaluation. The highest coefficient of determination (R^2) achieved was 0.742 for the Random Forest model, indicating its effectiveness in capturing the relationships between technical parameters and CO₂ emission levels. Feature importance analysis revealed that turbine temperature-related parameters had the greatest influence on emission levels, whereas external atmospheric conditions played a secondary role. The obtained results are practically significant for the energy sector, as they can be used for emission monitoring, planning the modernization of energy facilities, informing environmental policy, and selecting optimal operational modes for equipment. Implementing such models in industrial practice will contribute to reducing greenhouse gas emissions, increasing energy efficiency, and supporting the realization of national sustainable development strategies. The study confirms that the use of modern machine learning-based analytical tools can make a substantial contribution to ensuring a country's environmental and energy security.

Keywords: CO₂ emission forecasting; energy security; machine learning; Random Forest; XGBoost; regression model; gas turbine installation; data standardization.

ДЯЧЕНКО ОЛЕКСАНДР ВАСИЛЬОВИЧ ✉ – кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматизації та кібербезпеки енергосистем, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7232-6585>; e-mail: diachenko.a.v@ukr.net.

ГАПОН ДМИТРО АНАТОЛІЙОВИЧ – доктор технічних наук, доцент, завідувач кафедри автоматизації та кібербезпеки енергосистем, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8609-9707>; e-mail: dmytro.hapon@khp.edu.ua.

БАЖЕНОВ ВОЛОДИМИР МИКОЛАЙОВИЧ – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматизації та кібербезпеки енергосистем, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-5450-8382>; e-mail: fider141@gmail.com.

РУДЕВИЧ НАТАЛІЯ ВАЛЕНТИНІВНА – доктор педагогічних наук, професор, професор кафедри автоматизації та кібербезпеки енергосистем, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2858-9836>; e-mail: n.rudevich@ukr.net.

ШВЕЦЬ СЕРГІЙ ВІКТОРОВИЧ – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматизації та кібербезпеки, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3716-141X>; e-mail: se55sh32@gmail.com.

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ РЕЖИМІВ РОБОТИ ЖИВИЛЬНОЇ МЕРЕЖІ НА ВЕЛИЧИНУ МЕРТВОЇ ЗОНИ СТРУМОВОЇ ВІДСІЧКИ

У статті детально аналізуються аспекти релейного захисту в сучасних електроенергетичних системах, зокрема використання струмового захисту як одного з основних методів забезпечення безпеки та надійності ліній електропередач. Релейний захист є ключовим елементом для своєчасного виявлення аварій, точного локалізування пошкоджених ділянок та швидкого відключення для запобігання поширенню аварії. Зокрема, струмова відсічка забезпечує оперативне відключення елемента мережі при досягненні струмом певного порогового значення, що ефективно діє при сильних коротких замиканнях поблизу джерела живлення. Однак одним із значних недоліків цього методу є його залежність від конфігурації та режиму роботи живильної мережі, що може призвести до збільшення мертвих зон, зниження селективності та зменшення чутливості захисту. У статті також розглядається застосування струмової відсічки та автоматичного повторного включення, що дозволяє не лише ефективно локалізувати пошкодження, а й мінімізувати час простою ліній. Автоматичне повторне включення є важливим елементом для швидкого відновлення живлення в разі тимчасових аварій, що особливо актуально для повітряних ліній, де часто спостерігаються короткочасні пошкодження. Крім того, у статті аналізуються впливи різних режимів роботи живильної мережі на ефективність струмового захисту, зокрема на розміри мертвих зон. Розрахунки показали, що в мінімальних режимах роботи системи мертва зона може збільшуватися вдвічі, що значно знижує ефективність струмового захисту. У статті також акцентується увага на тому, що для підвищення надійності захисту в таких умовах слід використовувати адаптивні методи, зокрема дистанційний захист. Результати досліджень, які автори виклали у статті, мають важливе значення для удосконалення існуючих методів релейного захисту, підвищення ефективності локалізації аварій та мінімізації часу відключення ліній, що є необхідним для забезпечення стабільної роботи енергетичних систем навіть у складних умовах експлуатації. Зокрема, підвищення чутливості та селективності захисту при змінних режимах роботи мережі дозволяє значно покращити стабільність функціонування енергосистем у всіх умовах, що є важливим кроком до покращення надійності та безпеки енергетичних мереж в умовах сучасних викликів.

Ключові слова: релейний захист; об'єкт захисту; струмова відсічка; мертва зона; чутливість; селективність; ефективність; надійність.

Вступ. У сучасних електроенергетичних системах релейний захист (РЗ) відіграє критично важливу роль у забезпеченні безпеки, надійності та стабільності функціонування ліній електропередач. Крім того, впровадження цифрових технологій у РЗ дозволяє автоматизувати контроль і керування енергосистемами, що підвищує їхню ефективність. Завдяки цьому знижуються експлуатаційні витрати, підвищується стабільність мережі та забезпечується раціональне використання енергоресурсів, що є ключовим для сталого розвитку [1].

Постановка проблеми. Пошкодження в мережах можуть виникати внаслідок коротких замикань (КЗ), перенапруг, атмосферних впливів або механічних ушкоджень, особливо в повітряних лініях, які найбільш вразливі до зовнішніх факторів. Завдання РЗ полягає у своєчасному виявленні аварійної ситуації, точній локалізації пошкодженої ділянки та швидкому її відключенні для запобігання подальшому поширенню

аварії. Одним із найпоширеніших методів такого захисту є струмовий захист, зокрема струмова відсічка (СВ).

СВ забезпечує швидке відключення елемента мережі без витримки часу при досягненні струмом певного порогового значення (уставки спрацювання). Це дозволяє ефективно діяти у разі сильних КЗ поблизу джерела живлення. Однак значущим недоліком цього типу захисту є залежність його чутливості від конфігурації та режиму роботи живильної мережі. В умовах змінної структури мережі це може призводити до збільшення мертвих зон (МЗ), недостатньої селективності або зменшення чутливості захисту [2, 3].

Для підвищення надійності електропостачання, особливо в разі короткочасних пошкоджень, широко застосовується автоматичне повторне включення (АПВ). У повітряних лініях, де часто виникають аварії тимчасового характеру, система АПВ дозволяє швидко відновити живлення без участі оперативного

© О. В. Дяченко, Д. А. Гапон, В. М. Баженов, Н. В. Рудевич, С. В. Швець, 2025



Ця робота ліцензується відповідно до **Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)**
Конфлікт інтересів: Автори заявили про відсутність конфлікту

персоналу. Комбіноване застосування СВ та АПВ дає змогу не лише ефективно локалізувати пошкодження, а й мінімізувати час простою ліній, забезпечуючи стабільну роботу енергосистеми навіть у складних умовах експлуатації.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Залежність чутливості СВ від режиму роботи живильної електричної мережі є актуальною темою та всебічно розглядається в сучасній технічній літературі [4–6]. Проте ці джерела лише частково розглядають вплив змінних режимів мережі, таких як зміна джерел живлення або перемикання схем.

У свою чергу [7–13] більш детально аналізують зміну параметрів струмів КЗ залежно від конфігурації мережі. Зокрема, підкреслюється, що у малопотужних мережах відсічка може не спрацювати через зниження струму нижче порога (уставки) спрацювання. У роботах [14, 15] вказано на необхідність врахування МЗ та пропонуються методи покращення селективності та чутливості. У роботах, присвячених АПВ, розглянуто взаємодію СВ з повторним включенням у повітряних лініях, що є критичним при короточасних аваріях. Загалом, джерела свідчать про необхідність адаптивного налаштування РЗ відповідно до режимів живлення [2].

Мета статті. Дослідити вплив режимів роботи живильної мережі на розміри МЗ СВ в кабельно-повітряних лініях (КПЛ) з урахуванням застосування АПВ в повітряній лінії.

Виклад основного матеріалу. У статті розглядається розрахунок системи захисту з урахуванням можливості АПВ після вимкнення внаслідок пошкодження повітряної лінії. У випадках аварій у кабельних мережах робота АПВ має бути заблокована, щоб запобігти подальшому погіршенню стану кабелю при повторній подачі живлення, якщо коротке замикання ще не усунуто. Такий підхід дозволяє підвищити надійність енергопостачання для споживачів і сприяє поверненню електричної мережі до нормального режиму функціонування. Часто після оперативного відключення частини мережі, де сталося КЗ через тимчасове порушення ізоляції або пробій повітряного проміжку, при повторному поданні напруги несправність не повторюється.

Також у статті проводиться дослідження впливу роботи живильної мережі (максимальний режим при $X_{с.макс.}$ та мінімальний при $X_{с.мін.}$) на розміри МЗ СВ в КПЛ.

Для аналізу цих питань були проведені розрахунки: максимального струмового захисту (МСЗ) КПЛ та розрахунок зміни розмірів СВ в залежності від режиму роботи живильної мережі.

Вихідні дані для розрахунку. Для розрахунків було використано мережу КПЛ 10 кВ, схема якої зображена на рис. 1. Дана мережа складається з:

- підстанції ПС-Б із двома трансформаторами ТМ-1600/10/0,4 кВА, напруга короткого замикання $U_{к.т.}^{\%} = 5,5\%$;
- підстанції ПС-В з навантаженням $P_{нав.} = 11$ МВт та $\cos\varphi = 0,83$;

- реактора РБ-10-1000-0,45 УЗ;
 - кабелю АСБл-10 3×150 , довжиною $L_{к.л.} = 2$ км;
 - повітряної лінії АС-10 150/19, довжиною $L_{п.л.} = 2$ км.
- Інші параметри мережі:
- коефіцієнт самозапуску $K_{сзп} = 1,7$;
 - опір системи в максимальному режимі $X_{с.макс.} = 0,3$ Ом;
 - опір системи в мінімальному режимі $X_{с.мін.} = 0,6$ Ом.

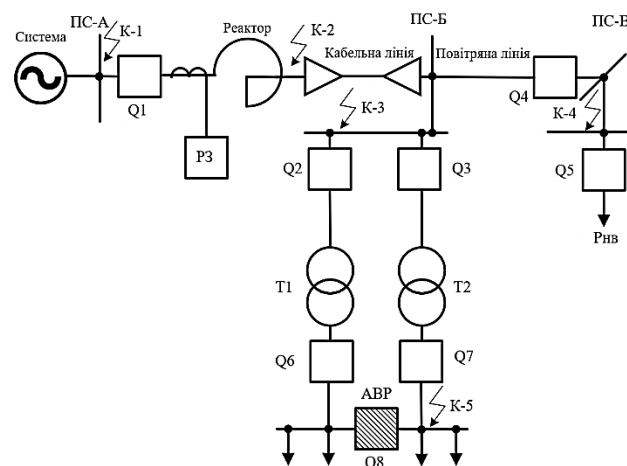


Рисунок 1 – Розрахункова схема об'єктів захисту КПЛ

Зазвичай при таких розрахунках активним опором трансформатора нехтують оскільки він набагато менший реактивного опору. Але для забезпечення більшої точності розрахунків конкретно в цьому випадку автори пропонують його розрахувати.

Знаходимо активний опір трансформатора Т1 та Т2 за формулою (1):

$$R_{T1} = R_{T2} = \frac{P_k \cdot 10^3 \cdot (U_{н.т.} \cdot 10^3)^2}{(S_{н.т.} \cdot 10^3)^2}, \text{ Ом}; \quad (1)$$

де P_k – втрати короткого замикання в трансформаторі $P_k = 16,5$ кВт;

$U_{н.т.}$ – номінальна напруга трансформатора, $U_{н.т.} = 10$ кВ;

$S_{н.т.}$ – номінальна потужність трансформатора $S_{н.т.} = 1600$ кВА.

Розраховуємо повний опір трансформатора за формулою (2):

$$Z_{T1} = Z_{T2} = \frac{U_{к.т.}^{\%}}{100} \cdot \frac{(U_{н.т.})^2}{S_{н.т.}}, \text{ Ом}; \quad (2)$$

де $U_{к.т.}^{\%}$ – напруга короткого замикання трансформатора, $U_{к.т.}^{\%} = 5,5\%$.

Знаходимо реактивний опір трансформатора за формулою (3):

$$X_{T1} = X_{T2} = \sqrt{Z_{T1,2}^2 - R_{T1,2}^2}, \text{ Ом}. \quad (3)$$

Розраховуємо активний опір кабельної лінії за формулою (4):

$$R_{к.л.} = L_{к.л.} \cdot r_{к.}, \text{ Ом}; \quad (4)$$

де $L_{к.л.}$ – довжина кабельної лінії, $L_{к.л.} = 2 \text{ км}$;
 $r_{к.}$ – активний опір кабеля, $r_{к.} = 0,206 \frac{\text{Ом}}{\text{км}}$.

Розраховуємо реактивний опір кабельної лінії за формулою (5):

$$X_{к.л.} = L_{к.л.} \cdot x_{к.}, \text{ Ом}; \quad (5)$$

де $x_{к.}$ – індуктивний опір кабеля, $x_{к.} = 0,079 \frac{\text{Ом}}{\text{км}}$.

Розраховуємо активний опір повітряної лінії за формулою (6):

$$R_{п.л.} = L_{п.л.} \cdot r_{А.С.}, \text{ Ом}; \quad (6)$$

де $L_{п.л.}$ – довжина повітряної лінії, $L_{п.л.} = 2 \text{ км}$;
 $r_{А.С.}$ – активний опір сталесалюмінієвих проводів (АС), $r_{А.С.} = 0,2046 \frac{\text{Ом}}{\text{км}}$.

Розраховуємо реактивний опір повітряної лінії за формулою (7):

$$X_{п.л.} = L_{п.л.} \cdot x_{А.С.}, \text{ Ом}; \quad (7)$$

де $x_{к.}$ – індуктивний опір сталесалюмінієвих проводів (АС), $x_{А.С.} = 0,358 \frac{\text{Ом}}{\text{км}}$.

Проводимо розрахунок опорів для МСЗ точок К1–К5 в максимальному режимі роботи системи (рис. 1) з урахуванням АВР.

Опір для точки К1 буде дорівнювати реактивному опору системи в максимальному режимі $X_{К1} = X_{с.макс.}$. Активним опором нехтуємо.

Знаходимо активні і реактивні опори для точки К2. Активний опір для точки К2 буде дорівнювати опору реактора, відповідно $R_{К2} = R_p = 0,045 \text{ Ом}$.

За формулою (8) знаходимо реактивний опір для точки К2 в максимальному режимі:

$$X_{К2,макс.} = X_{с.макс.} + X_p, \text{ Ом}; \quad (8)$$

де X_p – індуктивний опір реактора, $X_p = 0,45 \text{ Ом}$.

Знаходимо активний $R_{К3,макс.}$ та реактивний $X_{К3,макс.}$ опори для точки К3 за формулами (9) та (10):

$$R_{К3,макс.} = R_{К2,макс.} + R_{к.л.}, \text{ Ом}; \quad (9)$$

$$X_{К3,макс.} = X_{К2,макс.} + X_{к.л.}, \text{ Ом}. \quad (10)$$

Розраховуємо активний $R_{К4,макс.}$ та реактивний $X_{К4,макс.}$ опори для точки К4 за формулами (11) та (12):

$$R_{К4,макс.} = R_{К3,макс.} + R_{п.л.}, \text{ Ом}; \quad (11)$$

$$X_{К4,макс.} = X_{К3,макс.} + X_{п.л.}, \text{ Ом}. \quad (12)$$

Знаходимо активний $R_{К5,макс.}$ та реактивний $X_{К5,макс.}$ опори для точки К5 за формулами (13) та (14):

$$R_{К5,макс.} = R_{К3,макс.} + R_{т.}, \text{ Ом}; \quad (13)$$

$$X_{К5,макс.} = X_{К3,макс.} + X_{т.}, \text{ Ом}. \quad (14)$$

За формулою (15) знаходимо повні опори для кожної точки К1–К5:

$$Z_{К1-5,макс.} = \sqrt{R_{К1-5,макс.}^2 + X_{К1-5,макс.}^2}, \text{ Ом}. \quad (15)$$

За формулою (16) знаходимо величину струмів короткого замикання в максимальному режимі роботи системи для кожної точки К1–К5:

$$I_{К1-5} = \frac{U_{ном.}}{\sqrt{3} \cdot Z_{К1-5,макс.}}, \text{ кА}; \quad (16)$$

де $U_{ном.}$ – номінальна напруга лінії, $U_{ном.} = 10,5 \text{ кВ}$.

Розрахунок МСЗ. Перший ступінь захисту це СВ без витримки за часом $t_{с.з.}^I = 0 \text{ с}$. За формулою (17) знаходимо струм уставки спрацювання першого ступеня захисту:

$$I_{с.з.,макс.}^I = K_H \cdot I_{К3,макс.}, \text{ кА}; \quad (17)$$

де K_H – коефіцієнт надійності, $K_H = 1,1$;

$I_{К3,макс.}$ – струм короткого замикання в точці К3, знайдений за формулою (16) при максимальному режимі роботи системи.

Перевіряємо на виконання умови по чутливості за формулою (18):

$$K_{ч,макс.}^I = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{I_{К1,макс.}}{I_{с.з.,макс.}^I} \geq 2; \quad (18)$$

де $I_{К1,макс.}$ – струм К3 в точці К1, знайдений за формулою (16) при максимальному режимі роботи системи.

Другий ступінь МСЗ це СВ з витримкою часу $t_{с.з.}^{II} = \Delta t = 0,5 \text{ с}$. Для розрахунку уставки спрацювання другого ступеня захисту (20), потрібно узгодити роботу захисту із першим ступенем захисту трансформатора Т за формулою (19):

$$I_{с.з.Т,макс.}^I = K_H \cdot I_{К5,макс.}, \text{ кА}; \quad (19)$$

де K_H – коефіцієнт надійності, оскільки точка К3 за трансформатором приймаємо $K_H = 1,5$;

$I_{К5,макс.}$ – струм К3 в точці К5, знайдений за формулою (16) при максимальному режимі роботи системи.

$$I_{с.з.,макс.}^{II} = K_H \cdot I_{с.з.Т,макс.}^I, \text{ кА}; \quad (20)$$

де K_H – коефіцієнт надійності для другого ступеня захисту приймаємо $K_H = 1,2$.

Перевіряєм на виконання умови по чутливості за формулою (21):

$$K_{ч, макс}^{II} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{I_{КЗ, макс}}{I_{с.з., макс}^{III}} \geq 2. \quad (21)$$

Третій ступінь відбудовується від МСЗ трансформатора. Розраховуємо струм уставки $I_{с.з., макс}^{III}$ за умовою повернення після вимкнення наскрізного струму КЗ $I_{КЗ, макс}$ за формулою (22):

$$I_{с.з., макс}^{III} = \frac{K_H \cdot K_{сзп}}{K_{пов}} \cdot I_{\Sigma}, \text{ кА}; \quad (22)$$

де $K_{сзп}$ – коефіцієнт самозапуску, $K_{сзп} = 1,7$;
 $K_{пов}$ – коефіцієнт повернення реле, приймаємо 0,96;

I_{Σ} – сумарний струм навантаження, знайдемо його за формулою (25).

Визначаємо номінальні струми навантаження підстанцій Б та В формули (23) та (24) (рис. 1).

$$I_{ПБ-В} = \frac{2 \cdot S_{н.т.}}{\sqrt{3} \cdot U_{н.т.}}, \text{ А}; \quad (23)$$

$$I_{ПБ-В} = \frac{P_{нав.}}{\sqrt{3} \cdot U_{ном.} \cdot \cos \varphi}, \text{ А}; \quad (24)$$

$$I_{\Sigma} = I_{ПБ-В} + I_{ПВ-В}, \text{ А}. \quad (25)$$

Знайдемо струм уставки за умовою відбудови від АПВ повітряної лінії за формулою (26):

$$I_{с.з., АПВ, макс}^{III} = K_H \cdot K_{сзп} \cdot I_{\Sigma}, \text{ кА}. \quad (26)$$

З двох умов розрахованих за формулами (22) та (26) вибираємо більше значення та приймаємо його за остаточне значення $I_{с.з., макс}^{III}$.

Перевіряємо на виконання умови по чутливості за формулою (27):

$$K_{ч, макс}^{III} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{I_{К4}}{I_{с.з., макс}^{III}} \geq 1,5; \quad (27)$$

де $I_{К4, макс}$ – струм КЗ в точці К4, знайдений за формулою (16).

Аналогічно по формулам (1)–(27) проводимо розрахунки для мінімального режиму живильної мережі енергосистеми, коли $X_{с.мін.} = 0,6 \text{ Ом}$.

Одним із головних недоліків МСЗ є його залежність від режиму роботи живильної електромережі. Ефективність та чутливість такого захисту змінюється в залежності від конфігурації мережі, величини струмів навантаження, а також напрямку потоку енергії. У деяких випадках, наприклад, при зміні схеми живлення або зменшенні струму КЗ, пристрій може не виявити аварію або зробити це із запізненням. Така ситуація створює загрозу для енергетичного обладнання, підвищує ймовірність його пошкодження, погіршує якість

електропостачання та знижує загальну надійність системи [2].

Далі представлені розрахункові дослідження, які демонструють, як режими роботи живильної мережі впливають на розміри МЗ СВ в КПЛ. В нашому випадку розглядалося два варіанти – максимальний та мінімальний режими роботи живильної мережі.

Розраховуємо опір спрацювання СВ (струмового захисту) за формулою (28):

$$Z_{с.з.} = \frac{U_{\phi}}{I_{с.з., макс}}, \text{ Ом}; \quad (28)$$

де U_{ϕ} – фазна напруга, в нашому випадку дорівнює 5,78 кВ;

$I_{с.з., макс}$ – струм спрацювання захисту першого ступеня СВ при максимальному режимі роботи живильної мережі $I_{с.з., макс} = I_{с.з., макс}^I$.

При розрахунках ми знехтували активним опором системи, тоді згідно формули (15) повний опір системи в максимальному режимі дорівнює $Z_{с.макс.} = X_{с.макс.}$, в мінімальному $Z_{с.мін.} = X_{с.мін.}$.

Знаходимо опір об'єкта захисту за формулою (29):

$$Z_{о.з.} = Z_p + Z_{к.л.}, \text{ Ом}; \quad (29)$$

де Z_p та $Z_{к.л.}$ – повні опори реактора та кабельної лінії знаходяться по формулі (15).

Розраховуємо сумарні опори для всієї системи для максимального та мінімального режиму роботи за формулами (30) та (31) відповідно:

$$Z_{сум.макс.} = Z_{с.макс.} + Z_p + Z_{к.л.}, \text{ Ом}; \quad (30)$$

$$Z_{сум.мін.} = Z_{с.мін.} + Z_p + Z_{к.л.}, \text{ Ом}. \quad (31)$$

Розраховуємо захисну здатність СВ в максимальному та в мінімальному режимах роботи живильної мережі за формулами (32) та (33) відповідно:

$$Z_{с.в.макс. \%} = \frac{(Z_{с.з.} - Z_{с.макс.})}{Z_{о.з.}} \cdot 100\%; \quad (32)$$

$$Z_{с.в.мін. \%} = \frac{(Z_{с.з.} - Z_{с.мін.})}{Z_{о.з.}} \cdot 100\%. \quad (33)$$

Проводимо розрахунок опору МЗ струмової відсічки в максимальному та мінімальному режимах роботи джерела живлення за формулами (34) та (35) відповідно:

$$Z_{м.з.макс. \%} = \frac{(Z_{сум.макс.} - Z_{с.з.})}{Z_{о.з.}} \cdot 100\%; \quad (34)$$

$$Z_{м.з.мін. \%} = \frac{(Z_{сум.мін.} - Z_{с.з.})}{Z_{о.з.}} \cdot 100\%. \quad (35)$$

Розраховуємо у скільки разів зменшилася захисна здатність (ефективність) струмового відсічення при

зміні роботи джерела живлення з максимального на мінімальний режим за формулою (36):

$$\text{Захисна здатність} = \frac{Z_{\text{с.в.макс.}\%}}{Z_{\text{с.в.мін.}\%}}. \quad (36)$$

Для порівняння розрахуємо все через довжину об'єкту захисту в кілометрах.

Розраховуємо довжину об'єкта захисту за формулою (37):

$$L_{\text{о.з.}} = \frac{Z_{\text{о.з.}}}{Z_{\text{п.к.л.}}}, \text{ км}; \quad (37)$$

де $Z_{\text{п.к.л.}}$ – повний погонний опір кабеля, який розраховується за формулою (15) через $r_{\text{к.}}$ та $x_{\text{к.}}$.

Знаходимо довжину що захищається СВ для ділянки об'єкта в максимальному та мініальному режимах роботи системи за формулами (38) та (39):

$$L_{\text{с.в.макс.}} = \frac{(Z_{\text{с.з.}} - Z_{\text{с.макс.}})}{Z_{\text{п.к.л.}}}, \text{ км}; \quad (38)$$

$$L_{\text{с.в.мін.}} = \frac{(Z_{\text{с.з.}} - Z_{\text{с.мін.}})}{Z_{\text{п.к.л.}}}, \text{ км}. \quad (39)$$

Знаходимо довжину МЗ для ділянки об'єкта в максимальному та мініальному режимах роботи системи за формулами (40) та (41), відповідно:

$$L_{\text{м.з.макс.}} = L_{\text{о.з.}} - L_{\text{с.в.макс.}} = L_{\text{о.з.}} \cdot Z_{\text{м.з.макс.}\%}, \text{ км}; \quad (40)$$

$$L_{\text{м.з.мін.}} = L_{\text{о.з.}} - L_{\text{с.в.мін.}} = L_{\text{о.з.}} \cdot Z_{\text{м.з.мін.}\%}, \text{ км}. \quad (41)$$

Результати, отримані в процесі розрахунків за формулами (1–41), були систематизовані та зведені в узагальнену табл. 1. За цими даними був побудований рис. 2, який ілюструє характер змін досліджуваних параметрів та дозволяє провести їх візуальний аналіз.

Висновки. У межах даного дослідження проведено аналіз мережі 10 кВ, яка включає систему живлення, реактор, КПЛ, а також РЗ на стороні системи. Основну увагу було приділено аналізу рівнів струмів КЗ з урахуванням роботи АПВ в повітряній лінії, а також оцінці впливу максимального та мінімального режимів роботи системи на ефективність РЗ, зокрема – на розміри МЗ.

З аналізу отриманих розрахунків (табл. 1) було підтверджено, що розміри МЗ СВ безпосередньо залежать від режиму роботи системи. У максимальному режимі МЗ становить 1,42 км (35 % від загальної довжини об'єкта захисту 4,05 км), тоді як у мініальному – збільшується до 2,78 км, що становить 68,6 % від загальної довжини об'єкта захисту (рис. 2). Така динаміка обумовлена зменшенням струмів КЗ у мінімальних режимах роботи системи, що призводить до неспрацювання захисту при фіксованих уставках. Це свідчить про обмежену ефективність СВ, в нашому випадку ефективність зменшилася в 2,06 рази (табл. 1).

Таблиця 1 – Результати розрахунків МЗ та об'єкта захисту при максимальному $X_{\text{с.макс.}} = 0,3 \text{ Ом}$ та мініальному $X_{\text{с.мін.}} = 0,6 \text{ Ом}$ режимі роботи системи

Результати розрахунків живильної мережі опори трансформаторів та КЛ і ПЛ (формули 1–7)			
$R_{T1} = R_{T2},$ Ом	$Z_{T1} = Z_{T2},$ Ом	$X_{T1} = X_{T2},$ Ом	$R_{\text{к.л.}},$ Ом
0,644	3,437	3,376	0,412
$X_{\text{к.л.}},$ Ом	$Z_{\text{к.л.}},$ Ом	$R_{\text{п.л.}},$ Ом	$X_{\text{п.л.}},$ Ом
0,158	0,441	0,409	0,716
Результати розрахунків для максимального режиму роботи: опори, струми КЗ, струми спрацювання захисту (I, II, III ступені), коефіцієнти чутливості для I, II та III ступеня (формули 8–22, 26, 27)			
$X_{K1,\text{макс.}},$ Ом	$R_{K2,\text{макс.}},$ Ом	$X_{K2,\text{макс.}},$ Ом	$R_{K3,\text{макс.}},$ Ом
0,3	0,045	0,75	0,5
$X_{K3,\text{макс.}},$ Ом	$R_{K4,\text{макс.}},$ Ом	$X_{K4,\text{макс.}},$ Ом	$R_{K5,\text{макс.}},$ Ом
0,908	0,9	1,624	1,1
$X_{K5,\text{макс.}},$ Ом	$Z_{K1,\text{макс.}},$ Ом	$Z_{K2,\text{макс.}},$ Ом	$Z_{K3,\text{макс.}},$ Ом
4,3	0,3	0,751	1,016
$Z_{K4,\text{макс.}},$ Ом	$Z_{K5,\text{макс.}},$ Ом	$I_{K1,\text{макс.}},$ кА	$I_{K2,\text{макс.}},$ кА
1,84	4,423	20,2	8,06
$I_{K3,\text{макс.}},$ кА	$I_{K4,\text{макс.}},$ кА	$I_{K5,\text{макс.}},$ кА	$I_{\text{с.з.макс.}},$ кА
5,96	3,29	1,37	6,56
$K_{\text{ч.макс.}}^I$	$I_{\text{с.з.Т.макс.}}^I$ кА	$I_{\text{с.з.макс.}}^{II}$ кА	$K_{\text{ч.макс.}}^{II}$
$2,66 \geq 2$	2,05	2,48	$2,07 \geq 2$
$I_{\text{с.з.макс.}}^{III}$ кА	$I_{\text{с.з.АПВмакс.}}^{III}$ кА	$K_{\text{ч.макс.}}^{III}$	
1,76	1,69	$1,61 \geq 1,5$	
Результати розрахунків струмів навантаження ПС-Б та ПС-В та струму на двох ПС (формули 23–25)			
$I_{\text{ПС-Б}},$ А	$I_{\text{ПС-В}},$ А	$I_{\Sigma},$ А	
175,95	728,73	904,68	
Результати розрахунків для мінімального режиму роботи: опори, струми КЗ, струми спрацювання захисту (I, II, III ступені), коефіцієнти чутливості для I, II та III ступеня (формули 8–22, 26, 27) з урахуванням мінімального режиму роботи			
$X_{K1,\text{мін.}},$ Ом	$R_{K2,\text{мін.}},$ Ом	$X_{K2,\text{мін.}},$ Ом	$R_{K3,\text{мін.}},$ Ом
0,6	0,045	1,05	0,5
$X_{K3,\text{мін.}},$ Ом	$R_{K4,\text{мін.}},$ Ом	$X_{K4,\text{мін.}},$ Ом	$R_{K5,\text{мін.}},$ Ом
1,208	0,9	1,924	1,1
$X_{K5,\text{мін.}},$ Ом	$Z_{K1,\text{мін.}},$ Ом	$Z_{K2,\text{мін.}},$ Ом	$Z_{K3,\text{мін.}},$ Ом
4,6	0,6	1,05	1,29
$Z_{K4,\text{мін.}},$ Ом	$Z_{K5,\text{мін.}},$ Ом	$I_{K1,\text{мін.}},$ кА	$I_{K2,\text{мін.}},$ кА
2,1	4,71	10,1	5,76
$I_{K3,\text{мін.}},$ кА	$I_{K4,\text{мін.}},$ кА	$I_{K5,\text{мін.}},$ кА	$I_{\text{с.з.мін.}},$ кА
4,69	2,87	1,28	5,16
$K_{\text{ч.мін.}}^I$	$I_{\text{с.з.Т.мін.}}^I$ кА	$I_{\text{с.з.мін.}}^{II}$ кА	$K_{\text{ч.мін.}}^{II}$
$1,69 < 2$	1,92	2,33	$1,74 < 2$
$I_{\text{с.з.мін.}}^{III}$ кА	$I_{\text{с.з.АПВмін.}}^{III}$ кА	$K_{\text{ч.мін.}}^{III}$	
1,76	1,69	$1,41 < 1,5$	
Результати розрахунків розміру МЗ СВ для максимального та мінімального режиму роботи мережі (формули 28–41)			
$Z_{\text{с.з.}},$ Ом	$Z_{\text{о.з.}},$ Ом	$Z_{\text{сум.макс.}},$ Ом	$Z_{\text{сум.мін.}},$ Ом
0,881	0,893	1,193	1,493
$Z_{\text{м.з.макс.}},$ %	$Z_{\text{м.з.мін.}},$ %	$L_{\text{о.з.}},$ км	$L_{\text{с.в.макс.}},$ км
35	68,6	4,05	2,63
$L_{\text{с.в.мін.}},$ км	$L_{\text{м.з.макс.}},$ км	$L_{\text{м.з.мін.}},$ км	
1,27	1,42	2,78	
Захисна здатність СВ зменшилась в 2,06 раза			

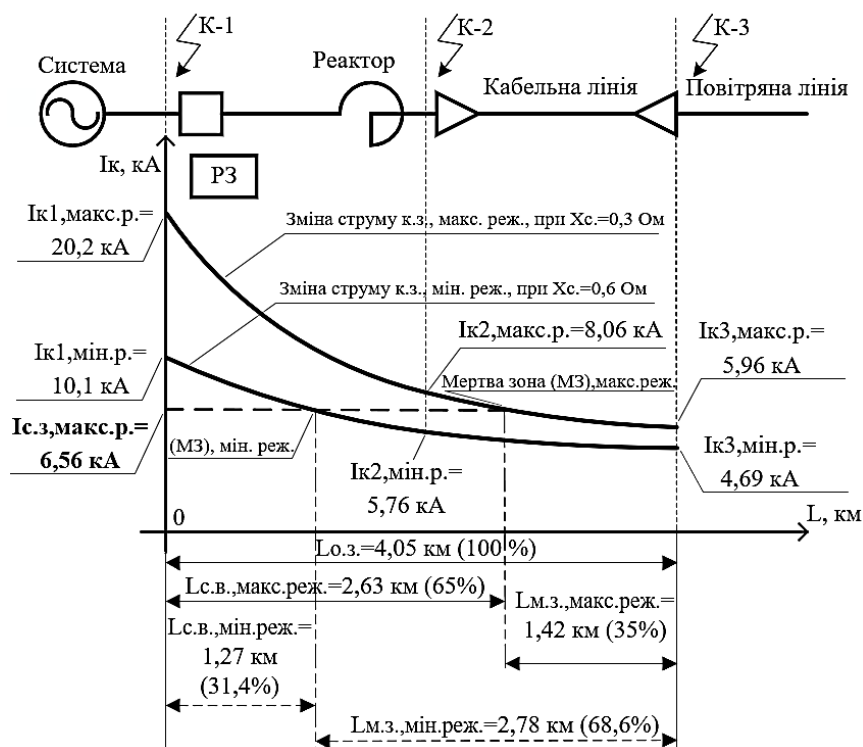


Рисунок 2 – Залежність струму КЗ від максимального $X_{c, \max.} = 0,3 \text{ Ом}$ та мінімального $X_{c, \min.} = 0,6 \text{ Ом}$ режиму роботи системи

Це, в свою чергу, відобразилося на чутливості захисту в мінімальному режимі роботи системи – жоден із трьох ступенів захисту не відповідає умові по чутливості $K_{ch, \min.}^I = 1,69 < 2$; $K_{ch, \min.}^{II} = 1,74 < 2$; $K_{ch, \min.}^{III} = 1,41 < 1,5$ (табл. 1) і навпаки в максимальному режимі роботи чутливість була в нормі. В умовах змінного навантаження зменшення ефективності (чутливості) відсічки не гарантує надійного виявлення аварій на всій протяжності лінії.

Натомість такого недоліку позбавлений дистанційний захист, який визначає аварію не лише за величиною струму, а й за відстанню до місця пошкодження. Це дозволяє забезпечити надійне виявлення КЗ незалежно від режиму роботи системи.

Список літератури

1. Аналіз стану та проблеми розвитку електроенергетики в Україні / О. В. Дяченко та ін. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Гідравлічні машини та гідроагрегати. 2024. № 1. С. 83–87. DOI: <https://doi.org/10.20998/2411-3441.2024.1.12>.
2. Релейний захист і автоматика: навчальний посібник у 2-х частинах / С. В. Панченко та ін. Харків: УкрДУЗТ, 2020. Ч. 1. 250 с.
3. Кідиба В. П. Релейний захист електроенергетичних систем. Львів: Національний університет "Львівська політехніка", 2013. 533 с.
4. ДСТУ EN 60255-1:2022. Вимірювальні реле та захисне обладнання. Частина 1. Загальні вимоги. Чинний від 2023-12-31. Вид. офіц.
5. Грищенко А. І., Кравченко В. В. Релейний захист і автоматизація електроенергетичних систем: навчальний посібник. Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2021. 208 с.

6. Козарський Д. П., Майструк Е. В., Козарський І. П. Основи релейного захисту та автоматизації енергосистем: навч. посіб. Чернівці: Чернів. нац. ун-т, 2019. 133 с.
7. Horowitz S. H., Niemira J. K., Phadke A. G. Power System Relaying. 4th ed. Wiley & Sons, Incorporated, John, 2013. 400 p.
8. Northcote-Green J., Wilson R. G. Control and Automation of Electrical Power Distribution Systems (Power Engineering). CRC, 2006. 464 p.
9. Rebizant W., Szafran J., Wiszniewski A. Digital Signal Processing in Power System Protection and Control. London: Springer London, 2011. 316 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-0-85729-802-7>.
10. Ustun T. S., Ozansoy C., Zayegh A. Modeling of a centralized microgrid protection system and distributed energy resources according to IEC 61850-7-420. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2012. Vol. 27, no. 3. P. 1560–1567. DOI: <https://doi.org/10.1109/tpwrs.2012.2185072>.
11. Andersson G. Modelling and Analysis of Electric Power Systems: Lecture. Zürich: ITET ETH, 2008. 172 p. URL: <https://www.yumpu.com/en/document/view/4227429/modelling-and-analysis-of-electric-power-systems-eeh-eth-zurich>
12. High voltage engineering testing / ed. by H. M. Ryan. Institution of Engineering and Technology, 2013. 960 p. DOI: <https://doi.org/10.1049/pbpo066e>.
13. Power System Dynamics: Stability and Control / J. Machowski et al. Wiley & Sons, Incorporated, John, 2020. 896 p.
14. Lackovic V. Overcurrent protection fundamentals. Woodcliff Lake, NJ, USA: Continuing Education and Development, Inc. 52 p. URL: <https://www.cedengineering.com/userfiles/Overcurrent%20Protection%20Fundamentals-R1.pdf>.
15. CIGRE WG B5.10. Protection, control and monitoring of series compensated networks. CIGRE, 2010. 150 p.

References

1. O. Diachenko, D. Gapon, I. Karpaliuk, and T. Donetska, "Analysis of the state and problems of electricity development in Ukraine", *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units*, no. 1, pp. 83–87, Nov. 2024, doi: <https://doi.org/10.20998/2411-3441.2024.1.12> (in Ukrainian)

2. S. V. Panchenko, V. S. Blyndiuk, V. M. Bazhenov, M. M. Odiehov, and Yu. O. Semenenko, *Releinyi zakhyst i avtomatyka [Relay protection and automation]*, Part 1. Kharkiv: UkrDUZT, 2020. (in Ukrainian)
3. V. P. Kidyba, *Releinyi zakhyst elektroenergetychnykh system [Relay protection of electric power systems]*. Lviv: Nats. un-t "Lviv. politekhnika", 2013. (in Ukrainian)
4. *Vymiruvalni rele ta zakhysne obladnannia. Chastyna 1. Zahalni vymohy [Measuring relays and protection equipment - Part 1: Common requirements]*, DSTU EN 60255-1:2022, DP «Ukrainskyi naukovo-doslidnyi i navchalnyi tsentr problem standartyzatsii, sertyfikatsii ta yakosti» (DP «UkrNDNTs»).
5. A. I. Hryshchenko and V. V. Kravchenko, *Releinyi zakhyst i avtomatyzatsiia elektroenergetychnykh system [Relay protection and automation of electric power systems]*. Kharkiv: O.M. Beketov Kharkiv Nat. Univ. Urban Economy, 2021. (in Ukrainian)
6. D. P. Koziarskyi, E. V. Maistruk, and I. P. Koziarskyi, *Osnovy releinoho zakhystu ta avtomatyzatsii enerhosystem [Basics of relay protection and automation of power systems]*. Chernivtsi: Chernivtsi Nat. Univ., 2019. (in Ukrainian)
7. S. H. Horowitz, J. K. Niemira, and A. G. Phadke, *Power System Relaying*, 4th ed. Wiley & Sons, Inc., John, 2013.
8. J. Northcote-Green and R. G. Wilson, *Control and Automation of Electrical Power Distribution Systems (Power Engineering)*. CRC, 2006.
9. W. Rebizant, J. Szafran, and A. Wiszniewski, *Digital Signal Processing in Power System Protection and Control*. London: Springer Lond., 2011, doi: <https://doi.org/10.1007/978-0-85729-802-7>
10. T. S. Ustun, C. Ozansoy, and A. Zayegh, "Modeling of a centralized microgrid protection system and distributed energy resources according to IEC 61850-7-420", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 27, no. 3, pp. 1560–1567, Aug. 2012, doi: <https://doi.org/10.1109/tpwrs.2012.2185072>
11. G. Andersson, *Modelling and Analysis of Electric Power Systems*. Zürich: ITET ETH, 2008. [Online]. Available: <https://www.yumpu.com/en/document/view/4227429/modelling-and-analysis-of-electric-power-systems-eeh-eth-zurich>
12. H. M. Ryan, Ed., *High Voltage Engineering Testing*. Institution Eng. Technol., 2013, doi: <https://doi.org/10.1049/pbpo066e>
13. J. Machowski, Z. Lubosny, J. W. Bialek, and J. R. Bumby, *Power System Dynamics: Stability and Control*. Wiley & Sons, Inc., John, 2020.
14. V. Lackovic, *Overcurrent Protection Fundamentals*. Woodcliff Lake, NJ, USA: Continuing Educ. Develop., Inc. [Online]. Available: <https://www.cedengineering.com/userfiles/Overcurrent%20Protection%20Fundamentals-R1.pdf>
15. CIGRE WG B5.10, "Protection, control and monitoring of series compensated networks", CIGRE, Technical Brochures 411, Apr. 2010.

Надійшло (received) 02.06.2025

UDC 621.31

DIACHENKO OLEKSANDR ✉ – Candidate of Technical Sciences (PhD), Associate Professor of the Department of Automation and Cybersecurity of Power Systems, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7232-6585>; e-mail: diachenko.a.v@ukr.net.

GAPON DMYTRO – Doctor of Technical Sciences, Docent, Head of the Department of Automation and Cybersecurity of Power Systems, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8609-9707>; e-mail: dmytro.hapon@kpi.edu.ua.

BAZHENOV VOLODYMYR – Candidate of Technical Sciences (PhD), Docent, Associate Professor of the Department of Automation and Cybersecurity of Power Systems, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-5450-8382>; e-mail: fider141@gmail.com.

RUDEVICH NATALIYA – Doctor of Pedagogic Sciences, Full Professor, Professor of the Department of Automation and Cybersecurity of Power Systems, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2858-9836>; e-mail: n.rudevich@ukr.net.

SHVETS SERHII – Candidate of Technical Sciences (PhD), Docent, Associate Professor of the Department of Automation and Cybersecurity of Power Systems, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3716-141X>; e-mail: se55sh32@gmail.com.

RESEARCH ON THE IMPACT OF OPERATING MODES OF THE FEEDING NETWORK ON THE SIZE OF THE DEAD ZONE IN CURRENT PROTECTION

The article provides a detailed analysis of relay protection aspects in modern power systems, with a particular focus on the use of overcurrent protection as one of the primary methods for ensuring the safety and reliability of transmission lines. Relay protection is a key component for the timely detection of faults, accurate localization of damaged sections, and rapid disconnection to prevent the spread of disturbances. In particular, overcurrent protection ensures the prompt disconnection of a network element when the current reaches a predefined threshold, which is especially effective during severe short circuits occurring close to the power source. However, one of the major drawbacks of this method is its dependence on the configuration and operating mode of the supply network, which may lead to increased dead zones, reduced selectivity, and diminished protection sensitivity. The article also examines the application of overcurrent protection in combination with automatic reclosing, which not only enables effective fault localization but also minimizes transmission line downtime. Automatic reclosing plays a crucial role in the fast restoration of power supply during temporary faults, which are common in overhead lines where short-term disturbances frequently occur. Additionally, the article analyzes the impact of different operating conditions of the power supply network on the effectiveness of overcurrent protection, particularly concerning the extent of dead zones. Calculations have shown that under minimum load conditions, the dead zone can double in size, significantly reducing protection effectiveness. The article emphasizes the necessity of using adaptive methods, such as distance protection, to improve protection reliability under these conditions. The research findings presented in the article are essential for improving existing relay protection methods, enhancing fault localization efficiency, and minimizing line outage time, which is crucial for maintaining the stable operation of power systems even under challenging operating conditions. Improving protection sensitivity and selectivity under varying network conditions significantly enhances power system stability, representing a key step toward increased reliability and safety of modern energy networks.

Keywords: relay protection; protected object; current-based disconnection; dead zone; sensitivity; selectivity; efficiency; reliability.

КОВАЛЬ ОЛЕКСАНДР АНАТОЛІЙОВИЧ – кандидат економічних наук, доцент, доцент кафедри обліку і фінансів, Національний університет «Запорізька політехніка»; м. Запоріжжя, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6471-6564>; e-mail: catalexzap66@gmail.com.

КОВАЛЬ ВІКТОРІЯ МИКОЛАЇВНА – старший викладач кафедри філософії, Національний університет «Запорізька політехніка»; м. Запоріжжя, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1393-8351>; e-mail: vicktoria_koval@ukr.net.

ДЄВОЧКІН ВАСИЛЬ ФЕДОРОВИЧ ✉ – аспірант кафедри електроприводу та автоматизації промислових установок, Національний університет «Запорізька політехніка»; м. Запоріжжя, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-2381-5245>; e-mail: vdev@zp.edu.ua.

ПЕРСПЕКТИВИ ІНВЕСТИЦІЙ У РОЗВИТОК ВІДНОВЛЮВАЛЬНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ НА ПРИКЛАДІ НІМЕЧЧИНИ

Робота присвячена дослідженню інвестиційних процесів в галузі генерації електроенергії Німеччини, зокрема – в сфері відновлювальних джерел енергії. Робота надає комплексний аналіз інвестицій у різні сектори зеленої енергетики Німеччини, зокрема, фотовольтаїку, вітрову енергетику та гідроенергетику, на основі детальних статистичних даних, що дозволяє чітко простежити тенденції та їх зміни за останні два десятиліття. У роботі досліджуються не лише обсяги фінансування, але й фактори, які впливають на розподіл інвестицій між різними відновлювальними джерелами енергії. Особлива увага приділяється виявленню причин зростання інвестицій у фотовольтаїку та вітрову енергетику, а також аналізу проблем, пов'язаних із розвитком гідроенергетики через обмежену кількість локацій для нових об'єктів. Визначені основні фактори, які впливають на зростання ризиків для стабільного та доступного енергозабезпечення населення, промисловості та транспорту. Визначені необхідні зміни в напрямках, принципах та джерелах інвестування в електрогенерацію на прикладі Німеччини. Виявлені сильні та слабкі сторони німецького досвіду інвестицій у відновлювальні джерела енергії. Проаналізовано на основі статистичних матеріалів поточний стан, перспективи та потенційні ризики інвестиційного процесу на ринках електроенергії Німеччини. В роботі враховано як історичний досвід, так і поточний досвід як позитивних зрушень в галузі енергозабезпечення, так і негативний в частині проблемних подій не тільки в Німеччині, але й в Європі в цілому, в тому числі регіональні та національні випадки блекаутів, які були викликані недоліками балансування енергосистем, які, в свою чергу, були обумовлені державною політикою в галузі генерації, транспортування та обробки електроенергії.

Ключові слова: електроенергія; генерація; відновлювальні джерела енергії; фотовольтаїка; гідроенергетика; вітрова енергетика; інвестиції; балансування генерації; блекаут.

Вступ. Останнім часом в Європі взагалі та в Німеччині особисто суттєво зросла частка відновлювальних джерел генерації електроенергії (ВДЕ). Загалом це можна привітати, але за цей же час також виросли випадки порушень роботи енергосистем на регіональному та національному рівні. Регіональні блекаути проходили в деяких регіонах Німеччини, США (Техас, Каліфорнія); національні блекаути сталися в Іспанії та Португалії [1]. Необхідність дослідження суто фінансово-економічних причин цього явища очевидна.

Вагомий науковий внесок у дослідження сутності ринку зробили зарубіжні та вітчизняні вчені: В. Базилевич, У. Джевонс, А. Маршалл, С. Мочерний, А. Тіммерман. Питанням функціонування ринків енергетичних ресурсів присвячено праці: В. Баранніка, Н. Кузьминчук, Б. Слупського, О. Суходолі та інших. Разом з тим, незважаючи на ґрунтовні наукові розвідки вищезазначених вчених, не втрачають актуальності дослідження присвячені проблематиці функціонування сучасного ринку енергії в Україні.

Мета статті. Дослідити ефективність інвестицій у виробництво «зеленої» електроенергії на прикладі Німеччини, виділити слабкі та сильні сторони інвестиційних процесів в енергетиці.

Задачі дослідження:

- визначити динаміку інвестиційних процесів в енергетиці Німеччини;

- визначити основні напрямки інвестицій в енергетику;
- дослідити практичні результати інвестицій в аспекти їх впливу інвестицій на споживачів.

Результати дослідження. Екологічний перехід Німеччини, результати якого на сьогоднішній день спостерігають багатомільйонне німецьке населення та численна українська діаспора, має у своїй суті мету максимально ефективно та у найбільш короткий проміжок часу знизити негативний вплив енергетичного сектору держави на її екологічну складову. Для досягнення поставленої мети, були проведені численні засідання у парламенті Німеччини та Європейського Союзу (ЄС). Дане питання хвилює десятки мільйонів німців, що сприяло формуванню особливого відношення уряду країни до питань з екології.

Наприкінці 2008 року Європейська комісія ухвалила «Пакет з клімату та енергетики» [2], спрямований на декарбонізацію економік країн ЄС. Таким чином, до вимог до країн-членів можна віднести збільшення використання енергії з відновлювальних джерел до 20 %. На момент 2020 року, у Німеччині, частка відновлювальних джерел енергії складала 45,8 % від загальнонаціонального виробництва, у той час як на момент ухвалення «Пакету з клімату та енергетики» у 2008 році, частка становила 15,3 % [3, 4]. Для досягнення цілей пакету, необхідні були значні

© О. А. Коваль, В. М. Коваль, В. Ф. Дєвочкін, 2025



Ця робота ліцензується відповідно до **Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)**
Конфлікт інтересів: Автори заявили про відсутність конфлікту

інвестиції як у низьковуглецеві технології, так і в інфраструктуру, що забезпечило надійність постачання та підвищило його ефективність. За період 2008–2020 роки, у розвиток сектора відновлювальної енергетики було інвестовано понад 230 мільярдів євро [3–8].

Згідно опублікованого у 2014 році §1 закону EEG 2023, що вступив в силу на початку 2023 року, Німеччина взяла курс на збільшення долі вироблення екологічно чистої електроенергії до 80 % від загальнонаціонального рівня виробництва до кінця 2030 року [9]. До 2035 року, майже вся електроенергія, вироблена в Німеччині, повинна бути екологічно чистою. За період 2014–2024 років, частка відновлюваних джерел енергії у споживанні електроенергії зросла з 24,5 % від загального виробництва до 53 % [3–8]. Якщо оперувати абсолютними величинами, то рівень виробництва відновлювальної енергії за період, що досліджується, зріс на майже 70 % з 161,9 до 273,2 МВт/годину (рис. 1).

Таким чином, можна констатувати, що Німеччина впевнено розвивається у напрямку, заданому EEG 2023 та вже на сьогоднішній день досягла вагомих результатів.

Німецький енергетичний сектор є важливим елементом економіки країни, однак його сучасна

структура викликає чимало дискусій. Основу енергопостачання наразі складають ВДЕ, які забезпечують понад 50 % виробництва електроенергії. Попри досягнення у цій галузі, ВДЕ залишаються відносно дорогими та залежними від погодних умов, що створює додаткові ризики для енергетичної стабільності.

Нажаль, не все так райдужно, адже за період 2014–2024 років, загальне виробництво електроенергії впало на майже 14 % [3–8, 10–12]. Таким чином, спостерігаємо навіть не стагнацію, а рецесію у енергетичному секторі Німеччини (рис. 2).

Варто зауважити, що драматичне падіння рівня виробництва електроенергії у період з 2022 по 2023 роки пов'язано з рішенням Німецької держави щодо зупинення роботи останніх ядерних об'єктів. Таким чином, вже на момент 2024 року, в державі не виробляється енергія мирного атому [13].

Особливо відчутним є вплив політики відмови від атомної енергетики, яка раніше забезпечувала значну частину енергопостачання країни. Перехід на ВДЕ був обумовлений екологічними міркуваннями, однак він поставив Німеччину в залежність від імпорту енергоносіїв і збільшив навантаження на електромережі через нестабільність виробництва енергії з вітру та сонця.

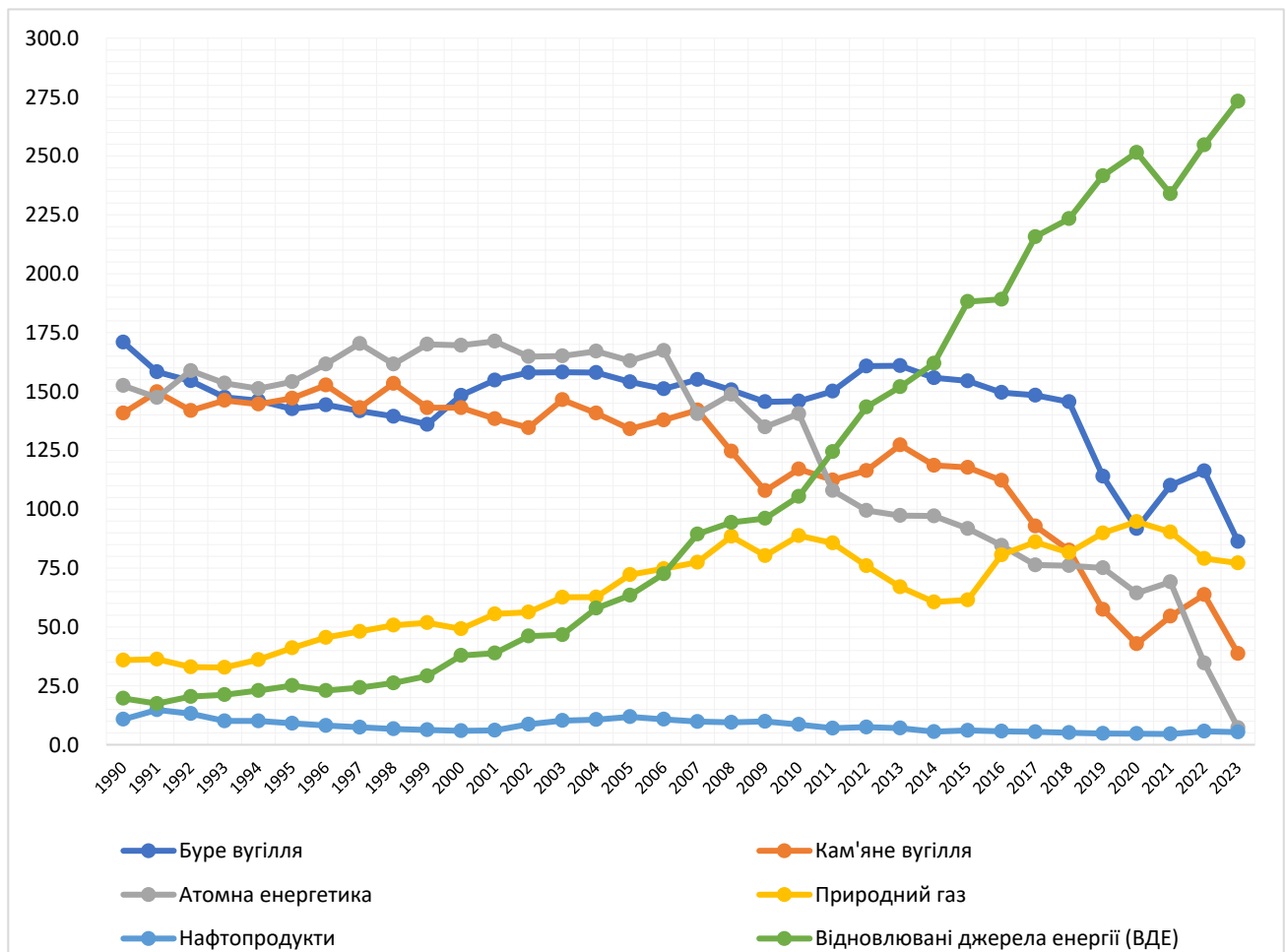


Рисунок 1 – Валове виробництво електроенергії в Німеччині за джерелами енергії, МВт/годину

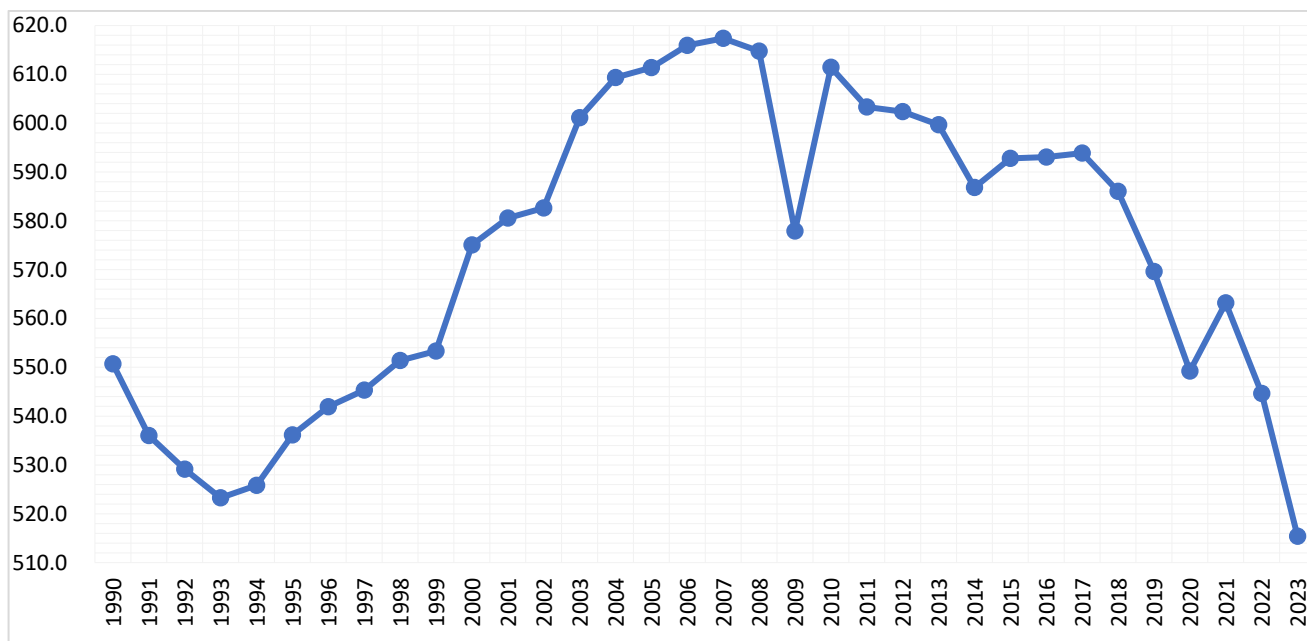


Рисунок 2 – Обсяги генерації електроенергії в Німеччині без урахування ВДЕ, млрд МВт/год

Ця ситуація породжує необхідність у розвитку систем зберігання енергії, модернізації інфраструктури та пошуку більш ефективних рішень, які могли б компенсувати недоліки нинішньої моделі. Хоча Німеччина продовжує позиціонувати себе як лідера у сфері зеленої енергетики, існують серйозні виклики, пов'язані із забезпеченням надійності, доступності та безпечності енергопостачання.

Розвиток використання відновлюваної енергії в Німеччині перетворило цей сектор на ключовий елемент економіки (табл. 1, рис. 3) [14]. Суттєве зростання обсягу інвестицій, що розпочалося у 2022 році, набуло ще більшого масштабу у 2023 році. Таким чином, інвестиції у будівництво об'єктів відтворювальної енергетики у році 2023 зросли на 68 %, і досягли рекордної суми у 37,3 млрд євро, у порівнянні з попереднім роком. Безсумнівно, ці інвестиції значно сприяли збільшенню рівня виробництва електроенергії. Таким чином, за цей же період, виробництво відновлюваної енергії у Німеччині збільшилось майже на 8 %. Завдяки тому, що значна частина доданої вартості створюється через виробництво та введення цих об'єктів на території країни, ці інвестиції безпосередньо сприяють зростанню економіки Німеччини

Інші сектори, зокрема постачальники біопалива та компанії, що займаються обслуговуванням, отримали додаткові 23,2 млрд євро від витрат на підтримку роботи та експлуатацію об'єктів відновлюваної енергетики. Такі економічні стимули сприяли створенню багатьох компаній, часто значущих у регіональному масштабі, у секторі відновлюваної енергетики Німеччини, забезпечуючи значну кількість робочих місць.

Динаміка інвестицій у ВДЕ в Німеччині демонструє суттєві зміни за останні два десятиліття. Як видно з табл. 1 і рис. 3, обсяги фінансування в різні сегменти «зеленої» енергетики суттєво варіювалися

залежно від політичних пріоритетів, технологічного прогресу та ринкових умов.

На початку 2000-х років ключовим напрямом були наземні вітрові електростанції, які отримували найбільшу частку інвестицій. Проте вже з 2010-х років у центрі уваги опинилася фотовольтаїка, яка почала активно зростати, особливо в період 2009–2012 років, коли інвестиції у цей сектор сягнули рекордних показників – понад 19,5 млрд євро у 2010 році.

Динаміка інвестицій у ВДЕ в Німеччині демонструє суттєві зміни за останні два десятиліття. Як видно з табл. 1 та рис. 3, обсяги фінансування в різні сегменти «зеленої» енергетики суттєво варіювалися залежно від політичних пріоритетів, технологічного прогресу та ринкових умов.

Водночас такі напрямки, як гідроенергетика та геотермальна енергія, залишалися менш привабливими для інвесторів через обмежений потенціал розвитку та високі початкові витрати. Зокрема, гідроенергетика демонструє стійке зниження інвестицій, що підтверджує проблему недостатньої кількості нових придатних локацій для будівництва гідроелектростанцій (ГЕС). Справа в тому, що гідроресурси Європи, придатні для електрогенерації, вже використовуються приблизно на 80 %, і потенціал цього напрямку в Європі загалом досить низький [15].

Значні вкладення також спостерігалися у біоенергетику, однак їх частка з часом стабілізувалася через обмежену рентабельність у порівнянні з фотовольтаїкою та вітровою енергетикою.

Особливу увагу привертає розвиток морських вітрових електростанцій, які почали отримувати вагомі інвестиції після 2010 року. Хоча їх частка менша, ніж у наземних станцій, цей напрям залишається перспективним завдяки високій ефективності та стабільності виробництва енергії. Крім того, винесення вітрових електростанцій за межі територіальних вод виключає їх з переліку об'єктів оподаткування.

Таблиця 1 – Динаміка обсягів інвестицій в різні сектори енергетики Німеччини, млн євро

Рік	Гідро-енергетика	Наземна вітро-енергетика	Морська вітро-енергетика	Фотовольтаїка	Сонячна теплова енергія	Геотермальна енергія та тепло навколишнього середовища	Електроенергія з біомаси	Тепло з біомаси	Разом
2000	520	1920		260	440	130	530	900	4700
2001	340	3070		360	610	180	800	920	6280
2002	120	3930		680	370	190	770	900	6960
2003	170	3360		760	480	210	1340	1080	7400
2004	210	2710		3530	470	290	1640	1100	9950
2005	240	2490		4840	630	410	1910	1510	12030
2006	220	3220		4010	990	940	2270	2300	13950
2007	330	2470	30	5330	760	920	2280	1500	13620
2008	370	2540	170	7970	1700	1230	1980	1760	17720
2009	500	2800	470	13570	1490	1140	2020	1610	23600
2010	350	2110	450	19580	990	960	2240	1210	27890
2011	300	2860	610	15860	1060	990	3120	1320	26120
2012	200	3550	2440	11980	950	1060	790	1500	22470
2013	130	4490	4270	3380	860	1090	700	1560	16480
2014	90	7060	3940	1450	790	1080	670	1320	16400
2015	80	5370	3680	1480	800	1010	220	1290	13930
2016	60	6910	3370	1570	700	1210	270	1230	15320
2017	60	7450	3400	1660	540	1320	280	1230	15940
2018	120	3390	4100	2580	490	1520	390	1240	13830
2019	110	1650	2130	3370	440	1410	350	1260	10720
2020	100	2190	80	4860	530	1920	320	1940	11940
2021	70	2990	290	5210	550	2530	250	2730	14620
2022	70	3830	1250	7960	690	4570	210	3650	22230
2023	10	5960	1380	17760	420	8770	220	2770	37290

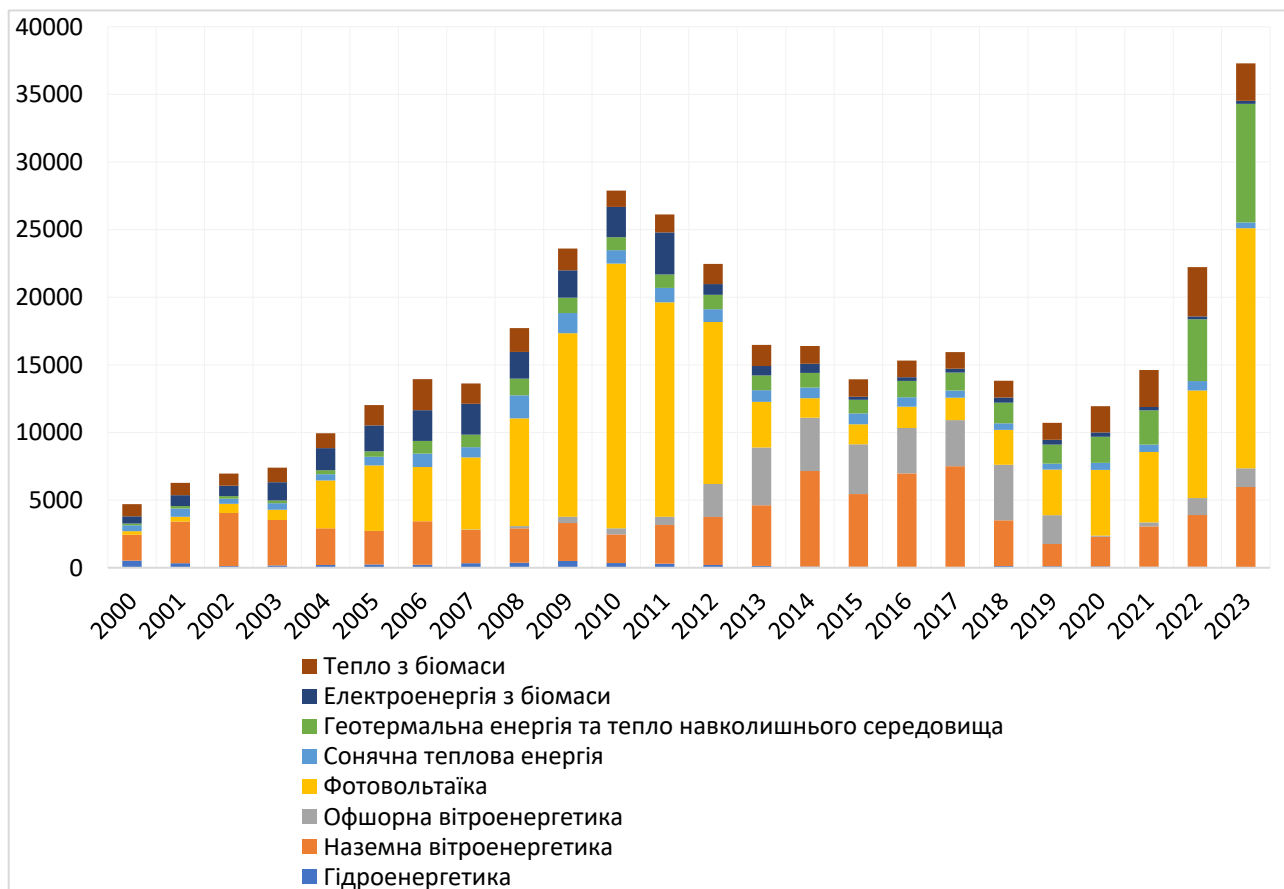


Рисунок 3 – Інвестиції в будівництво об'єктів відновлюваної енергії в Німеччині, млн євро

Фотовольтаїка — це технологія виробництва електроенергії за допомогою сонячних панелей, яка відіграє важливу роль у структурі відновлювальної енергетики Німеччини. За останнє десятиліття цей сектор отримав значну фінансову підтримку, і сьогодні інвестиції у фотовольтаїку перевищують вкладення в інші сегменти зеленої енергетики, зокрема вітрову та біоенергетику.

Зростання інтересу до фотовольтаїки пов'язане з кількома факторами: зниженням вартості виробництва сонячних панелей, компактністю цих панелей та відносною легкістю їх встановлення (німецькі бюргери досить часто встановлюють такі панелі на дахах власних будинків), підтримкою з боку держави, прагненням зменшити залежність від вуглеводнів та націленістю як загальнонаціонального парламенту, так і парламентів земель Німеччини на підвищення рівня життя населення. Однак такий фокус на одному напрямі викликає запитання щодо його реальної ефективності.

Попри позитивну динаміку, існують виклики. Основним недоліком фотовольтаїки є її залежність від погодних умов, що ускладнює стабільне енергопостачання без додаткових систем накопичення енергії. Зростання інвестицій у цей сектор часто відбувається за рахунок скорочення фінансування інших напрямів, наприклад, гідроенергетики, яка є більш стабільною, але менш популярною. Хоча варто зазначити, що розвиток гідроенергетики у Німеччині та інших країнах Європи має також свої особливості [15].

Як видно з графіка на рис. 4, обсяги інвестицій у фотовольтаїку демонструють чітку тенденцію до зростання. Пік спостерігався у 2010–2011 роках, після чого відбулося тимчасове зниження. Однак останні роки вказують на новий стрибок інвестицій, зокрема в 2022–2023 роках, коли в галузь було вкладено більше коштів, ніж у попереднє десятиліття, що пов'язано з

початком війни. Загалом, сонячна енергетика залишається стратегічним напрямом для енергетичного сектору Німеччини.

Гідроенергетика є одним із традиційних джерел відновлюваної енергії, яке активно використовувалося у Німеччині протягом багатьох десятиліть. Як видно з графіка на рис. 5, обсяги інвестицій у цей сектор мали пікові значення на початку 2000-х років, досягли найвищої точки у 2009–2011 роках, але згодом значно зменшилися.

Однією з головних причин спаду інвестицій є обмежений потенціал для розширення цього сектору в Німеччині. Більшість доступних і придатних для будівництва ГЕС місць уже використовуються [16]. Подібна ситуація спостерігається і в інших європейських країнах, де через географічні особливості та екологічні обмеження можливості для нових великих ГЕС дуже обмежені.

Іншою проблемою є екологічний вплив гідроенергетики. Будівництво нових ГЕС може призводити до зміни екосистем річок, негативно впливати на водну флору та фауну, а також викликати соціальну критику через необхідність затоплення великих територій.

Незважаючи на це, гідроенергетика залишається важливим елементом енергетичної системи Німеччини. Хоча великі ГЕС більше не будуються, інвестиції в цьому секторі переорієнтувалися на модернізацію існуючих станцій, підвищення їхньої ефективності та розширення малих ГЕС, які мають менший вплив на довкілля [17].

Отже, хоча потенціал розвитку гідроенергетики в Німеччині обмежений, цей сектор все ще відіграє роль у стабілізації енергетичного балансу країни, особливо в умовах зростання частки нестабільних відновлюваних джерел енергії, таких як сонячна та вітрова енергетика.

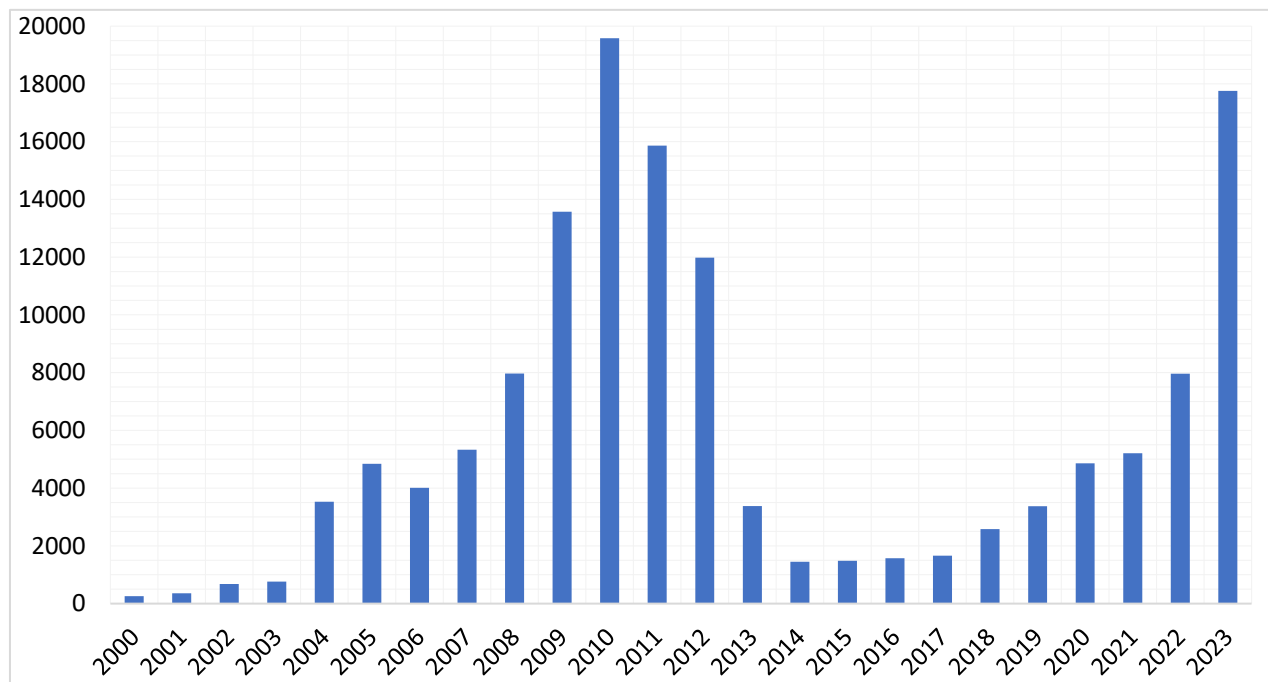


Рисунок 4 – Інвестиції в фотовольтаїку, млн євро

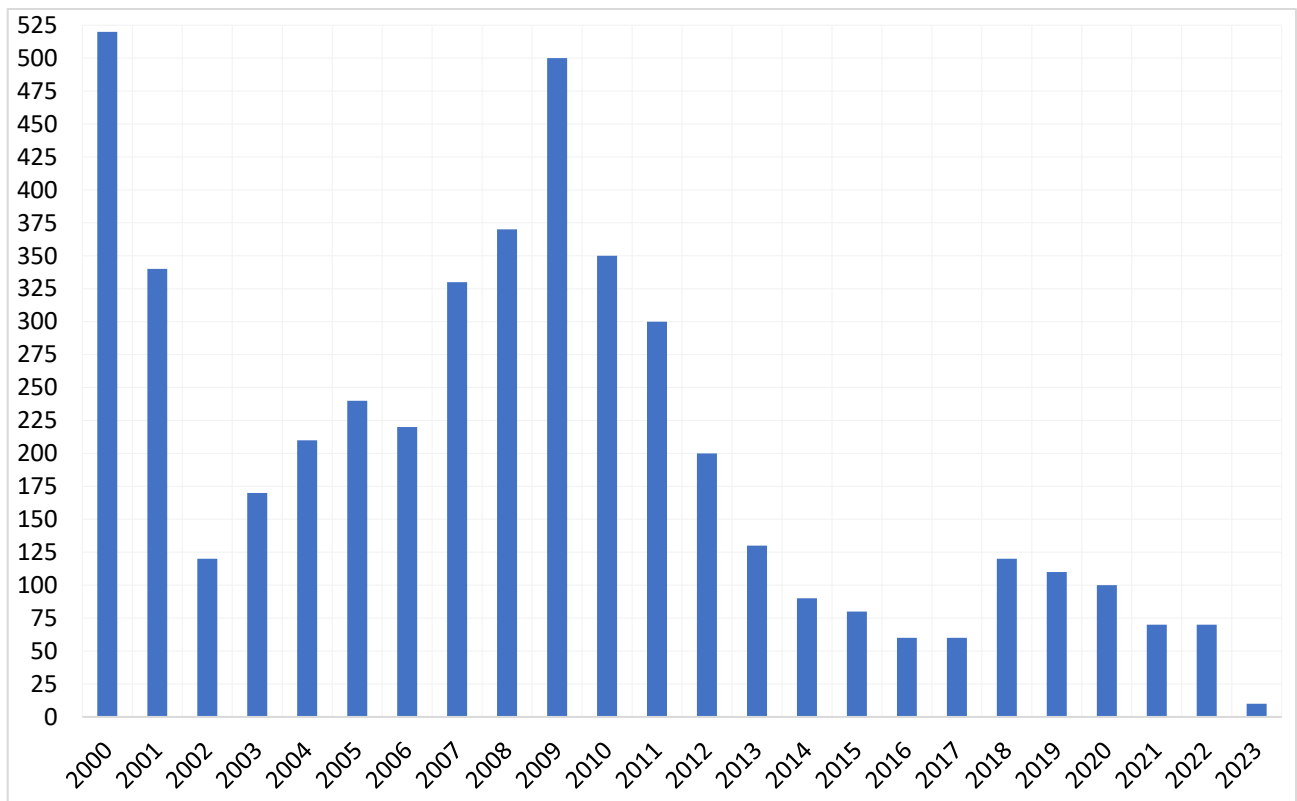


Рисунок 5 – Інвестиції в будівництво ГЕС в Німеччині, млн євро

Протягом останніх 5-ти років, також бачимо постійне зростання цін на електроенергію (рис. 6) [18]. Таким чином, за період 2018–2024 роки, ціна зросла на 270 %, а протягом 2022 року, ціна на ф'ючерс коливалася у діапазоні від 165,73 до 465,1 євро. Таким чином, агресія РФ на Україні вельми суттєво вдарила по гаманцю німецького бюргера. Можна сказати, що німецька політика щодо збільшення рівня виробництва

відновлювальної електроенергії була достатньо успішною. На графіку на рис. 7, бачимо що у 1990 році, частка відновлювальної енергії від загальнонаціонального виробництва становила 3.5 %, у 2000 році – 6.5 %, у 2010 році це вже 17,2 %, а у 2024 це вже більше половини – 53 %. Можна впевнено сказати, що Німеччина впевнено йде до поставленої цілі у 80 % зростання цін на електроенергію!

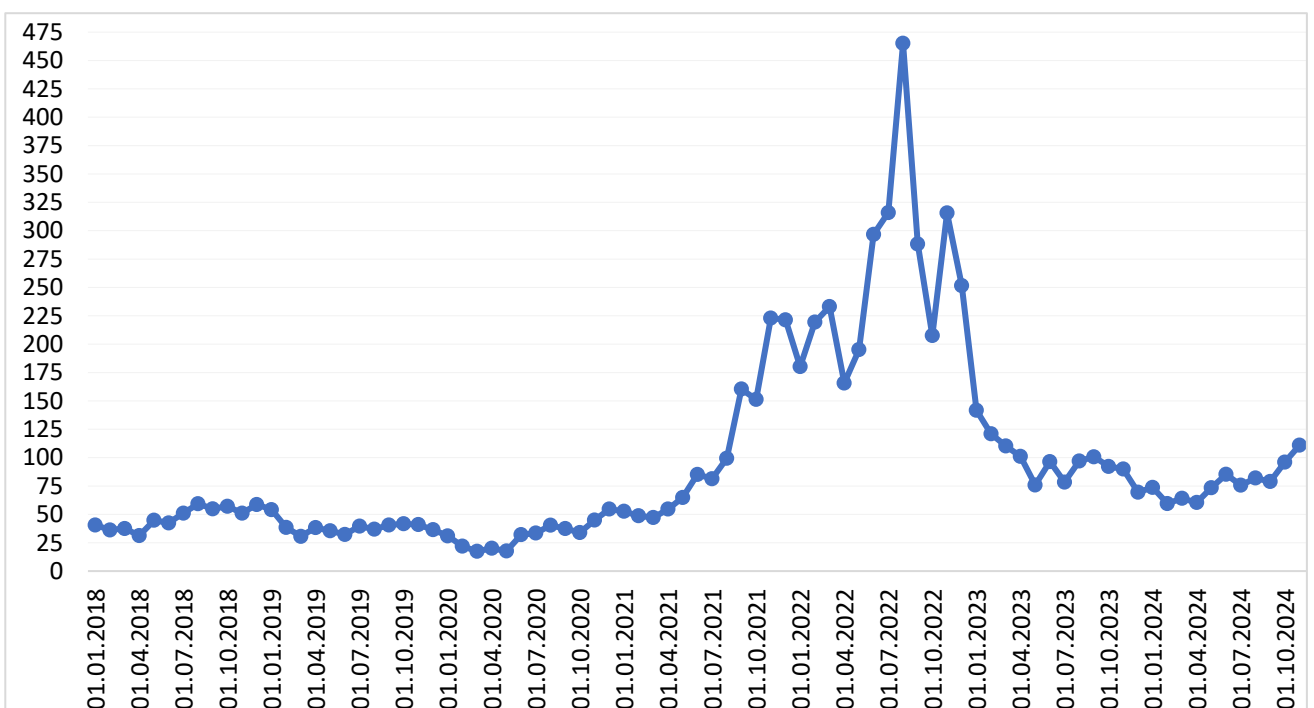


Рисунок 6 – Динаміка оптових цін на електроенергію, євро

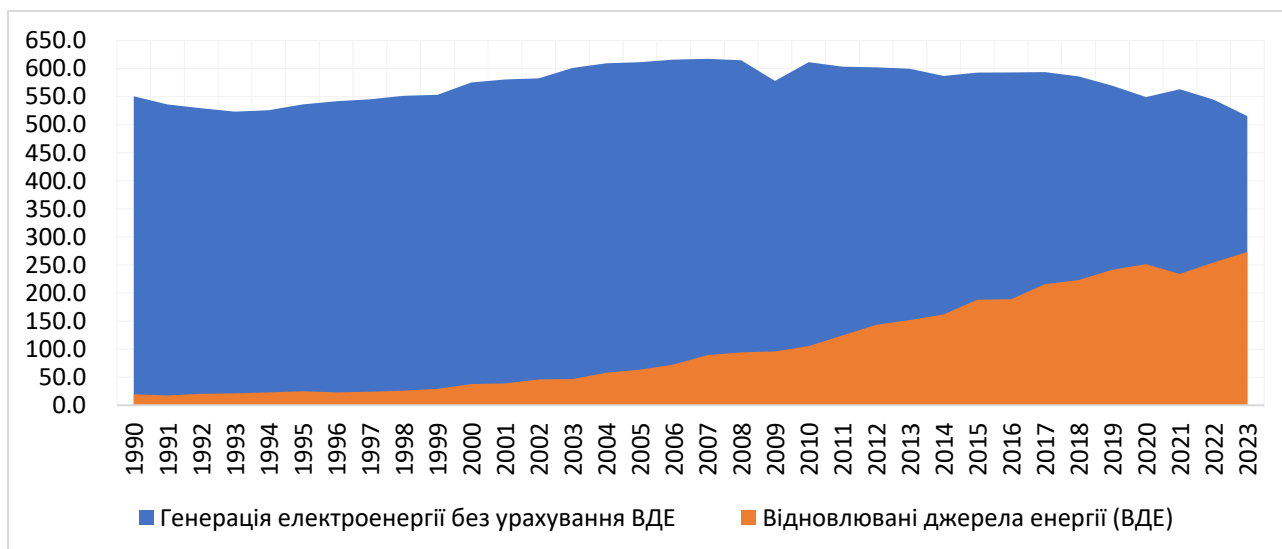


Рисунок 7 – Доля «зеленої» енергетики у валовому виробництві електроенергії Німеччини, млрд МВт/год

Підводячи підсумки, можна сказати, що німецький уряд діяв достатньо ефективно і досягав поставлених цілей у відносно короткий час. Більше того – поставлені цілі часто були перевиконані, як це було у випадку з «Пакетом з клімату та енергетики». Незважаючи на помітні успіхи, не менш помітні недоліки такої політики.

Таким чином, дії Німецької держави сприяли збільшенню рівня енергозалежності, адже за період з 2008 по 2023 роки, загальнонаціональне виробництво електроенергії скоротилось на 16,16 %, з 614,8 до 515,4 МВт/годину (рис. 2) [3–8, 10–12]. Отож, після початку війни Росії на Україні, німецький уряд не був здатний швидко замінити дешеві російські енергоносії. Це стало одним з факторів подорожчання електроенергії, однак не головним.

Найважливішою причиною підвищення цін на електроенергію є несбалансований перехід на виробництво виключно екологічно чистої енергії без урахування необхідності структурних змін в електричних мережах.

Наприклад, Португалія 92 % електроенергії виробляє на відновлювальних джерелах, а Іспанія до 2030 року планує збільшити частку ВДЕ до 74 % [19, 20]. Якщо частка відновлювальних джерел підвищується занадто високо, енергетична система країни потребує кардинальних інвестицій в обробку та передачу електроенергії між регіонами та країнами. Цей перехід потребує значних інвестицій як у розвиток нових технологій, так і в модернізацію енергетичної інфраструктури. Витрати на будівництво та експлуатацію відновлюваних джерел енергії часто вищі порівняно з традиційними джерелами, а додаткове фінансове навантаження на споживачів зумовлено також субсидіями та «зеленими» тарифами. В 2024 році Асоціація операторів енергосистем Європи заявила, що потребує інвестиції в розмірі більше 1,2 трлн. євро на будівництво ліній електропередач, трансформаторів тощо [21, 22]. Це практично неможливо під час великої економічної кризи. Більше того, ідея зеленого переходу так чи інакше потребує

відмови від інших джерел виробництва енергії. Логічним продовженням зеленої політики стає закриття атомних електростанцій, нафтопереробних заводів та вугільних шахт, що й бачимо зараз в Німеччині. Результатом таких дій неминуче стає зменшення конкурентоспроможності економіки та підвищення цін на всі товари, адже ціна на електроенергію напряму впливає на ціноутворення майже всіх товарів та послуг.

Висновок. Можна констатувати, що кризові явища в енергосистемі Німеччини та Європі загалом обумовлені штучно створеними недоліками грошово-кредитної політики Євросоюзу в енергетичній галузі, яка сформувала суттєві перешкоди для нормального функціонування інвестиційного контуру в енергетиці та інших галузях економіки. Значний дисбаланс в генерації, передачі та обробці електричної енергії в енергосистемі Німеччини та Євросоюзу в цілому вже призвів до значного зростання аварійних ситуацій в енергетиці, в тому числі до блекаутів цілих держав. Тому вихід із цього скрутного становища саме в кардинальній зміні галузевої фінансової політики, в тому числі – з боку держави.

Список літератури

1. Paradiso T. Did Renewables Cause Spain's Blackout?. *Energy Central*. URL: <https://www.energycentral.com/renewables/post/did-renewables-cause-spains-blackout-hu0X0D6J04mxJkN>.
2. European Commission. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions - 20 20 by 2020 - Europe's climate change opportunity. Brussels, 2008. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex:52008DC0030>.
3. Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW). Economic Impetus from Renewable Energy. Stuttgart, 2024. URL: https://www.bundeswirtschaftsministerium.de/Redaktion/EN/Downloads/Energy/kurzdokumentation-wirtschaftl-impulse-ee-2024-eng.pdf?__blob=publicationFile&v=2#:~:text=In%202022,%20investments%20in%20the,billion%20euros%20compared%20to%202019.
4. Büsgen U., Dürschmidt W. The expansion of electricity generation from renewable energies in Germany. *Energy Policy*. 2009. Vol. 37,

- no. 7. P. 2536–2545. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.10.048>.
5. Yıldız Ö. Financing renewable energy infrastructures via financial citizen participation – The case of Germany. *Renewable Energy*. 2014. Vol. 68. P. 677–685. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.02.038>.
 6. Duso T., Seldeslachts J., Szücs F. EU-Wettbewerbspolitik fördert Investitionen in den Energiesektoren. *DIW Wochenbericht*. 2016. Bd. 83, Nr. 15. S. 282–290. URL: <https://www.econstor.eu/handle/10419/130725>.
 7. Production, consumption and research on solar energy: The Spanish and German case / E. Sanz-Casado et al. *Renewable Energy*. 2014. Vol. 68. P. 733–744. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.03.013>.
 8. Daten und Fakten. *AG Energiebilanzen e. V.* URL: <https://ag-energiebilanzen.de/daten-und-fakten/>.
 9. Erneuerbare-Energien-Gesetz : Bundesgesetz vom 21.07.2014 : letzte Aktualisierung: 21. Februar 2025. URL: https://www.gesetze-im-internet.de/eeg_2014/BJNR106610014.html.
 10. Stromerzeugung nach Energieträgern (Strommix) von 1990 bis 2024 (in TWh) Deutschland insgesamt. *AG Energiebilanzen e. V.* URL: <https://ag-energiebilanzen.de/daten-und-fakten/zusatzinformationen/>.
 11. Electricity Production Data | World Electricity Statistics | Enerdata. *World Energy Statistics | Enerdata*. URL: <https://yearbook.enerdata.net/electricity/world-electricity-production-statistics.html>.
 12. Quaschnig V. Renewable Electricity Generation in Germany. *Volker Quaschnig - Erneuerbare Energien und Klimaschutz*. URL: https://www.volker-quaschnig.de/datserv/ren-strom-D/index_e.php.
 13. Appunn K. The history behind Germany's nuclear phase-out. *Clean Energy Wire*. URL: <https://www.cleanenergywire.org/factsheets/history-behind-germanys-nuclear-phase-out>.
 14. Working Group on Renewable Energy-Statistics (AGEE-Stat). Time series for the development of renewable energy sources in Germany. Dessau-Roßlau, 2024. 25 p. URL: https://www.bundeswirtschaftsministerium.de/Redaktion/DE/Downloads/Energie/zeitreihen-zur-entwicklung-der-erneuerbaren-energien-in-deutschland-1990-2023-en.pdf?__blob=publicationFile&v=8.
 15. Quaranta E. The future of sustainable hydropower in the EU: challenges, projections and opportunities. *Hydropower & Dams*. 2023. Vol. 30, no. 5. P. 45–51.
 16. Federal Environmental Agency. Hydroelectric Power Plants as a Source of Renewable Energy. *Umweltbundesamt*. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/en/publikationen/hydroelectric-power-plants-as-a-source-of-renewable>.
 17. Spänhoff B. Current status and future prospects of hydropower in Saxony (Germany) compared to trends in Germany, the European Union and the World. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014. Vol. 30. P. 518–525. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.10.035>.
 18. German Power Baseload Calendar Month Futures Price Today. *Investing.com*. URL: <https://www.investing.com/commodities/german-power-baseload-electricity-m-futures>.
 19. Renewable energy supplies 91% of electricity in Portugal. *AICEP*. URL: <https://www.portugalglobal.pt/en/news/2024/april/renewable-energy-supplies-91-of-electricity-in-portugal/>.
 20. Renewable energy projects in Spain. *Montel | Your Guide to Navigating Energy Markets*. URL: <https://montel.energy/resources/blog/renewable-energy-projects-in-spain-leading-europes-green-transition>.
 21. Unlocking Investments: ENTSO-E recommends adapting TSOs' regulations to finance grid expansion. *Power Line Magazine*. URL: <https://powerline.net.in/2025/02/01/unlocking-investments-entso-e-recommends-adapting-tsos-regulations-to-finance-grid-expansion/>.
 22. Europe Faces Critical Stagnation in Climate and Environmental Investments. *energynews.pro*. URL: <https://energynews.pro/en/europe-faces-critical-stagnation-in-climate-and-environmental-investments/#:~:text=This%20would%20bring%20the%20total%20required%20effort,decarbonization,%20and%20improving%20energy%20efficiency%20in%20buildings>.
- ## References
1. T. Paradiso. “Did Renewables Cause Spain's Blackout?” *Energy Central*. [Online]. Available: <https://www.energycentral.com/renewables/post/did-renewables-cause-spains-blackout-hu0X0D6J04mxJkN>
 2. European Commission, “Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions - 20 20 by 2020 - Europe's climate change opportunity”, Brussels, 52008DC0030, Jan. 2008. [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex:52008DC0030>
 3. Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW), “Economic Impetus from Renewable Energy.”, Stuttgart, Sep. 2024. [Online]. Available: https://www.bundeswirtschaftsministerium.de/Redaktion/EN/Downloads/Energie/kurzdokumentation-wirtschaftl-impulse-ee-2024-eng.pdf?__blob=publicationFile&v=2#:~:text=In%202022,%20investments%20in%20the,billion%20euros%20compared%20to%202019
 4. U. Büsgen and W. Dürrschmidt, “The expansion of electricity generation from renewable energies in Germany”, *Energy Policy*, vol. 37, no. 7, pp. 2536–2545, Jul. 2009, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.10.048>
 5. Ö. Yıldız, “Financing renewable energy infrastructures via financial citizen participation – The case of Germany”, *Renewable Energy*, vol. 68, pp. 677–685, Aug. 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.02.038>
 6. T. Duso, J. Seldeslachts, and F. Szücs, “EU-Wettbewerbspolitik fördert Investitionen in den Energiesektoren”, *DIW Wochenbericht*, vol. 83, no. 15, pp. 282–290, 2016. [Online]. Available: <https://www.econstor.eu/handle/10419/130725>
 7. E. Sanz-Casado, M. L. Lascrain-Sánchez, A. E. Serrano-Lopez, B. Larsen, and P. Ingwersen, “Production, consumption and research on solar energy: The Spanish and German case”, *Renewable Energy*, vol. 68, pp. 733–744, Aug. 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.03.013>
 8. “Daten und Fakten.” *AG Energiebilanzen e. V.* [Online]. Available: <https://ag-energiebilanzen.de/daten-und-fakten/>
 9. Deutschland, Bundestag. (2014, Jul. 21). *Bundesgesetz, Erneuerbare-Energien-Gesetz*. [Online]. Available: https://www.gesetze-im-internet.de/eeg_2014/BJNR106610014.html
 10. “Stromerzeugung nach Energieträgern (Strommix) von 1990 bis 2024 (in TWh) Deutschland insgesamt.” *AG Energiebilanzen e. V.* [Online]. Available: <https://ag-energiebilanzen.de/daten-und-fakten/zusatzinformationen/>
 11. “Electricity Production Data | World Electricity Statistics | Enerdata.” *World Energy Statistics | Enerdata*. [Online]. Available: <https://yearbook.enerdata.net/electricity/world-electricity-production-statistics.html>
 12. V. Quaschnig. “Renewable Electricity Generation in Germany.” *Volker Quaschnig - Erneuerbare Energien und Klimaschutz*. [Online]. Available: https://www.volker-quaschnig.de/datserv/ren-strom-D/index_e.php
 13. K. Appunn. “The history behind Germany's nuclear phase-out.” *Clean Energy Wire*. [Online]. Available: <https://www.cleanenergywire.org/factsheets/history-behind-germanys-nuclear-phase-out>
 14. Working Group on Renewable Energy-Statistics (AGEE-Stat), “Time series for the development of renewable energy sources in Germany”, Dessau-Roßlau, Sep. 2024. [Online]. Available: https://www.bundeswirtschaftsministerium.de/Redaktion/DE/Downloads/Energie/zeitreihen-zur-entwicklung-der-erneuerbaren-energien-in-deutschland-1990-2023-en.pdf?__blob=publicationFile&v=8
 15. E. Quaranta, “The future of sustainable hydropower in the EU: Challenges, projections and opportunities”, *Hydropower & Dams*, vol. 30, no. 5, pp. 45–51, 2023.
 16. Federal Environmental Agency. “Hydroelectric power plants as a source of renewable energy.” *Umweltbundesamt*. [Online]. Available: <https://www.umweltbundesamt.de/en/publikationen/hydroelectric-power-plants-as-a-source-of-renewable>
 17. B. Spänhoff, “Current status and future prospects of hydropower in Saxony (Germany) compared to trends in Germany, the European Union and the World”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*,

- vol. 30, pp. 518–525, Feb. 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.10.035>
18. “German Power Baseload Calendar Month Futures Price Today.” Investing.com. [Online]. Available: <https://www.investing.com/commodities/german-power-baseload-electricity-m-futures>
 19. “Renewable energy supplies 91% of electricity in Portugal.” AICEP. [Online]. Available: <https://www.portugalglobal.pt/en/news/2024/april/renewable-energy-supplies-91-of-electricity-in-portugal/>
 20. “Renewable energy projects in Spain.” Montel | Your Guide to Navigating Energy Markets. [Online]. Available: <https://montel.energy/resources/blog/renewable-energy-projects-in-spain-leading-europes-green-transition>
 21. “Unlocking Investments: ENTSO-E recommends adapting TSOs’ regulations to finance grid expansion.” Power Line Magazine. [Online]. Available: <https://powerline.net.in/2025/02/01/unlocking-investments-entso-e-recommends-adapting-tsos-regulations-to-finance-grid-expansion/>
 22. “Europe faces critical stagnation in climate and environmental investments.” energynews.pro. [Online]. Available: <https://energynews.pro/en/europe-faces-critical-stagnation-in-climate-and-environmental-investments/#:~:text=This%20would%20bring%20the%20total%20required%20effort,decarbonization,%20and%20improving%20energy%20efficiency%20in%20buildings.>

Надійшла (received) 23.06.2025

UDC 620.97:339.1

OLEKSANDR KOVAL – Candidate of Economic Sciences (PhD), Docent, Associate Professor of the Department of Banking, Finances and Insurance, National University “Zaporizhzhia Polytechnic”; Zaporizhzhia, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6471-6564>; e-mail: catalexzap66@gmail.com.

VIKTORIA KOVAL – Senior Lecturer of the Department of Philosophy, National University “Zaporizhzhia Polytechnic”; Zaporizhzhia, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1393-8351>; e-mail: viktoria_koval@ukr.net.

VASYL DEVOCHKIN ✉ – PhD Student of the Department of Electric Drive and Commercial Plant Automation, National University “Zaporizhzhia Polytechnic”; Zaporizhzhia, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-2381-5245>; e-mail: vdev@zp.edu.ua.

INVESTMENT PROSPECTS IN THE DEVELOPMENT OF RENEWABLE ENERGY ON THE EXAMPLE OF GERMANY

The work is devoted to the study of investment processes in the field of electricity generation of Germany, in particular – in the field of renewable energy sources. The work provides a comprehensive analysis of investments in different sectors of green energy of Germany, in particular, photovoltaics, wind power and hydropower, based on detailed statistics, which allows to clearly trace trends and their changes in the last two decades. The work examines not only the amount of funding, but also the factors that affect the distribution of investments between different renewable energy sources. Particular attention is paid to identifying the causes of increased investment in photovoltaics and wind energy, as well as the analysis of problems related to the development of hydropower due to a limited number of locations for new facilities. The main factors that affect the risks for stable and affordable energy supply, industry and transport are identified. The necessary changes in the directions, principles and sources of investment in electrical generation on the example of Germany are identified. The strengths and weaknesses of German investment experience in renewable energy sources have been identified. The current state, interruption and potential risks of the investment process in German electricity markets are analyzed on the basis of statistical materials. Both historical experiences and current experiences of both positive changes in the field of energies are taken into account and negative in terms of problematic events not only in Germany, but also in Europe as a whole, including regional and national cases of Blacks, which were caused by deficiencies Electricity equipment.

Keywords: electricity; generation; renewable energy sources; photovoltaics; hydropower; wind energy; investment; generation balancing; blackout.

КОСТЮКОВ ІВАН ОЛЕКСАНДРОВИЧ ✉ – доктор технічних наук, завідувач кафедри теоретичних основ електротехніки, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8923-0579>; e-mail: iakostiukow@gmail.com.

КУЛИК ОЛЕКСІЙ СЕРГІЙОВИЧ – доктор філософії (PhD), старший викладач кафедри передачі електричної енергії, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2545-6314>; e-mail: oleksii.kulyk@khpi.edu.ua.

ЛИТВИНЕНКО СВІТЛАНА АНАТОЛІЙВНА – доктор філософії (PhD), доцент кафедри теоретичних основ електротехніки, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0818-2470>; e-mail: lytvynenko.svitlana@khpi.edu.ua.

КУБРИК БОРИС ІВАНОВИЧ – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри теоретичних основ електротехніки, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8327-0350>; e-mail: borys.kubryk@khpi.edu.ua.

ЛАВРІНЕНКО ОЛЬГА ВАЛЕРІЙВНА – кандидат історичних наук, доцент кафедри теоретичних основ електротехніки, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5274-3955>; e-mail: Lavrinenko.Olga@khpi.edu.ua.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ СХЕМИ ЗАМІЩЕННЯ ТРИЖИЛЬНОГО СИЛОВОГО КАБЕЛЮ З ПАПЕРОВОЮ ІМПРЕГНОВАНОЮ ІЗОЛЯЦІЄЮ ДЛЯ ВИПАДКУ РЕЗИСТИВНОГО ЗАЗЕМЛЕННЯ ОДНІЄЇ ІЗ ЖИЛ

Стаття присвячена експериментальному обґрунтуванню схеми заміщення трижильного силового кабелю з паперовою імпрегнованою ізоляцією в спільній металевій оболонці у випадку резистивного заземлення однієї із жил кабелю, що використовуються при застосуванні одного з методів вимірювання індивідуальних значень електричної ємності та тангенса кута діелектричних втрат шарів ізоляції між жилами силового кабелю. Проведене експериментальне обґрунтування було засноване на порівнянні результатів розрахунку сукупних значень електричної ємності для розглянутої схеми заміщення із результатами вимірювання, отриманими із застосуванням вимірювача імітансу з 2 клемми на двох різних частотах прикладеної тестової напруги. При розрахунку сукупних значень ємності для схеми із резистивним заземленням однієї із жил використовувались значення часткових ємностей, попередньо отримані із застосуванням відомих методик обстеження трижильних силових кабелів, що засновані на застосуванні сукупних вимірювань. Порівняння результатів розрахунку сукупних значень електричної ємності для схем заміщення ізоляції кабелю із резистивним заземленням однієї із жил з результатами вимірювань засвідчило можливість застосування розглянутої в статті схеми заміщення. Отримані результати можуть бути використані при контролі технічного стану ізоляції трижильних силових кабелів за параметрами тангенса кута діелектричних втрат та електричної ємності. Застосування розглянутого в статті методу контролю не вимагає врахування впливу додаткової складової паразитної індуктивності у схемі вимірювання на результати визначення параметрів діелектрика та є альтернативою відомим методам контролю, що засновані на застосуванні прямих та сукупних вимірювань.

Ключові слова: діагностика ізоляції; прямі вимірювання; сукупні вимірювання; часткові ємності; система лінійних алгебраїчних рівнянь.

Вступ. В багатьох практичних випадках контроль технічного стану ізоляції електротехнічного обладнання проводиться за параметрами електричної ємності та тангенса кута діелектричних втрат ($\text{tg}\delta$) [1–7]. Так, для зшитой поліетиленової ізоляції силових кабелів результати вимірювань $\text{tg}\delta$ в діапазоні частот від 10^{-2} до 10 Гц демонструють кореляцію із рівнем пробивної напруги [8], для паперової імпрегнованої ізоляції встановлена кореляція між $\text{tg}\delta$ та механічною характеристикою ізоляції – числом подвійних перегинів до розриву [9]. При контролі ізоляції трижильних силових кабелів в спільній металевій оболонці виникає задача визначення індивідуальних значень електричної ємності та $\text{tg}\delta$ для кожного з шарів ізоляції між струмопровідними жилами а також між жилами та оболонкою кабелю. При цьому використанні методи та засоби вимірювання повинні забезпечувати можливість усунення взаємного впливу сусідніх шарів

ізоляції на результати вимірювання їх діелектричних характеристик. При застосуванні прямих вимірювань застосовуються вимірювачі імітансу, що дозволяють забезпечити тризажимне підключення досліджуваного об'єкта контролю. В такому випадку виникає необхідність врахування можливого впливу резонансних явищ в об'єкті контролю, що зумовлені додатковою складовою індуктивності у схемі вимірювання, на результати контролю параметрів діелектрика. Застосування сукупних вимірювань дозволяє уникнути такого недоліку, та може бути проведене із застосуванням вимірювачів імітансу, що дозволяють забезпечити двозажимне підключення силового кабелю. В той же час, такі вимірювання характеризуються підвищеними витратами часу та можливим впливом похибок вимірювання сукупних значень електричної ємності на результати розрахунку часткових ємностей силового кабелю. Таким чином,

© І. О. Костюков, О. С. Кулик, С. А. Литвиненко, Б. І. Кубрик, О. В. Лавріненко, 2025



Ця робота ліцензується відповідно до **Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)**
Конфлікт інтересів: Автори заявили про відсутність конфлікту

при контролі ізоляції трижильних силових кабелів актуальною є задача розробки вдосконалених методів вимірювання індивідуальних значень часткових ємностей та $\text{tg}\delta$. Один з альтернативних методів передбачає застосування модифікованої схеми з'єднання металевих елементів конструкції кабелю, що полягає у резистивно-ємнісному заземленні однієї із жил кабелю, заземленні другої жили та прикладанні випробувальної напруги до шару ізоляції між третьою жилою та заземленою оболонкою кабелю [10]. Процес вимірювання полягає в регулюванні величини заземлюючого резистора до моменту нульового фазового зсуву між напругами на досліджуваному шарі ізоляції та на заземлюючому резисторі. Після вимірювання цих напруг повторне регулювання опору резистора, виконане за іншої величини підключеної паралельно до резистору допоміжної ємності, дає можливість сформулювати систему рівнянь, вирішення якої дозволяє розрахувати невідому часткову ємність та $\text{tg}\delta$ досліджуваного шару ізоляції. В той же час, застосування модифікованої схеми з'єднання металевих елементів конструкції кабелю вимагає експериментального обґрунтування відповідної схеми заміщення.

Мета статті полягає в експериментальному обґрунтуванні схеми заміщення трижильного силового кабелю з паперовою імпрегнованою ізоляцією у випадку резистивного з'єднання однієї з жил з заземленою оболонкою кабелю.

Методика експериментального обґрунтування схеми заміщення. На рис. 1 наведено модифіковану схему з'єднання металевих елементів конструкції кабелю, що використовується при застосуванні описаного методу контролю [10].

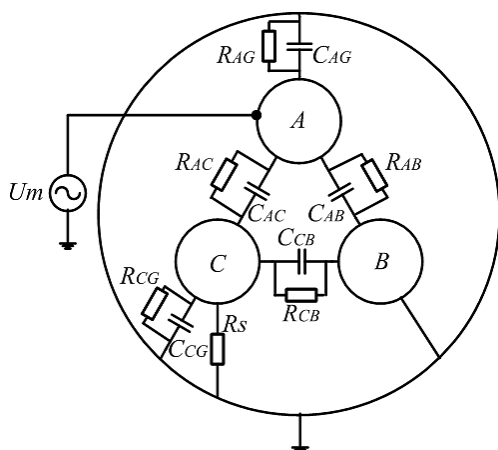


Рисунок 1 – Схема заміщення трижильного силового кабелю у спільній металевій оболонці у випадку резистивного заземлення жили C:

C_{AB}, C_{CB}, C_{AC} – часткові ємності, що утворені за рахунок ємнісних зв'язків між жилами силового кабелю,

C_{AG}, C_{CG} – часткові ємності, що утворені за рахунок ємнісного зв'язку між жилами та оболонкою кабелю,

$R_{AB}, R_{CB}, R_{AC}, R_{AB}, R_{CB}, R_{CA}$ – шунтуючі опори, величина яких визначається діелектричними втратами у відповідних шарах ізоляції, R_S – заземлюючий резистор

Наведена на рис. 1 схема застосовується для вимірювання часткової ємності між жилами A та C, при цьому вимірювання параметрів ізоляції між жилами A, B та B, C проводиться шляхом застосування аналогічних схем з'єднання металевих елементів конструкції. Експериментальна верифікація схеми заміщення на рис. 1 була проведена на основі попередньо визначених із застосуванням сукупних вимірювань часткових ємностей $C_{AB}, C_{CB}, C_{AC}, C_{AG}, C_{BG}, C_{CG}$. Визначення часткових ємностей із застосуванням сукупних вимірювань проводилось шляхом вирішення системи рівнянь [11]:

$$\mathbf{Ac} = \mathbf{b}; \quad (1)$$

де $\mathbf{b} = [C_A, C_B, C_C, C_{A_B}, C_{B_C}, C_{A_C}]^T$ – вектор результатів вимірювань сукупних значень електричної ємності. При формуванні вектору $\mathbf{b}$ складові C_A, C_B, C_C були виміряні шляхом подачі тестової напруги, відповідно, між жилами A, B, C та двома іншими, з'єднаними з оболонками жилами, складові $C_{A_B}, C_{B_C}, C_{A_C}$, відповідно, вимірювались при подачі тестової напруги між з'єднаними між собою жилами A та B, B, та C а також A, C та з'єднаною з оболонкою третьою жилою кабелю;

$\mathbf{c} = [C_{AB}, C_{BC}, C_{AC}, C_{AG}, C_{BG}, C_{CG}]^T$ – вектор, що містить невідомі часткові ємності силового кабелю;

$\mathbf{A}$ – матриця, рядки та стовпчики якої визначаються у відповідності до виразу:

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

На рис. 2–5 наведено результати повторних вимірювань сукупних значень електричної ємності $C_A, C_B, C_C, C_{A_B}, C_{B_C}, C_{A_C}$, що використовувались при вирішенні системи рівнянь (1).

В таблицях 1 і 2 наведено розраховані для серії з 47 повторних вимірювань середні арифметичні результатів вимірювання сукупних значень електричної ємності, а також визначені шляхом вирішення системи рівнянь (1) часткові ємності між металевими елементами конструкції кабелю.

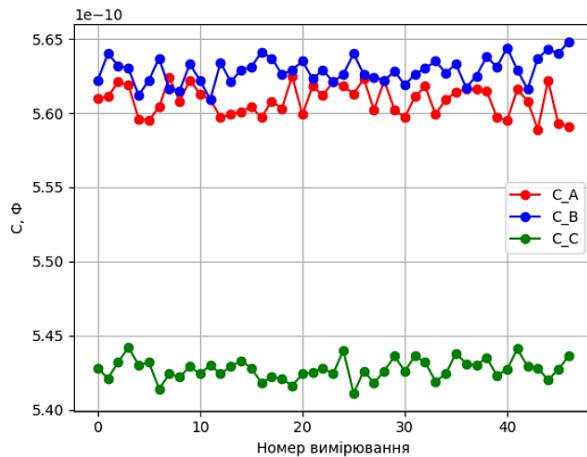


Рисунок 2 – Результати повторних вимірювань сукупних значень електричної ємності кабелю ААШВ при використанні схеми з'єднання металевих елементів «жила проти двох інших жил та оболонки» за частоти 1 кГц

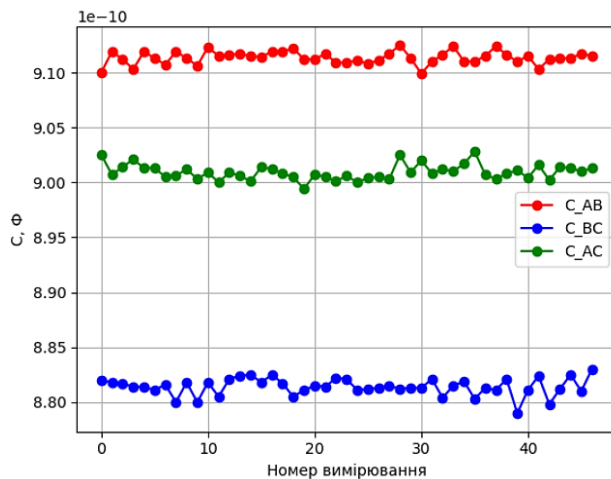


Рисунок 3 – Результати повторних вимірювань сукупних значень електричної ємності кабелю ААШВ при використанні схеми з'єднання металевих елементів «дві жили проти жили та оболонки» за частоти 1 кГц

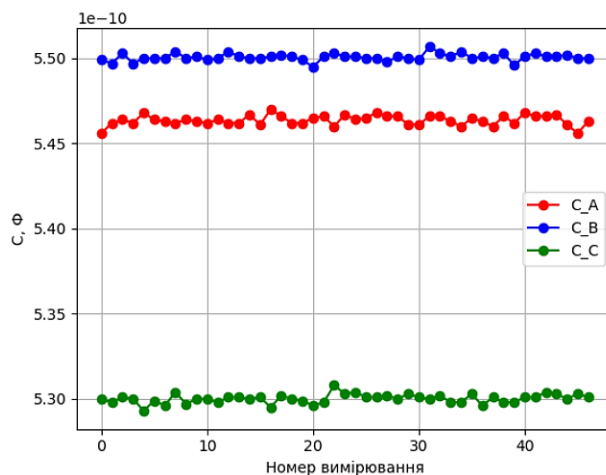


Рисунок 4 – Результати повторних вимірювань сукупних значень електричної ємності кабелю ААШВ при використанні схеми з'єднання металевих елементів «жила проти двох інших жил та оболонки» за частоти 10 кГц

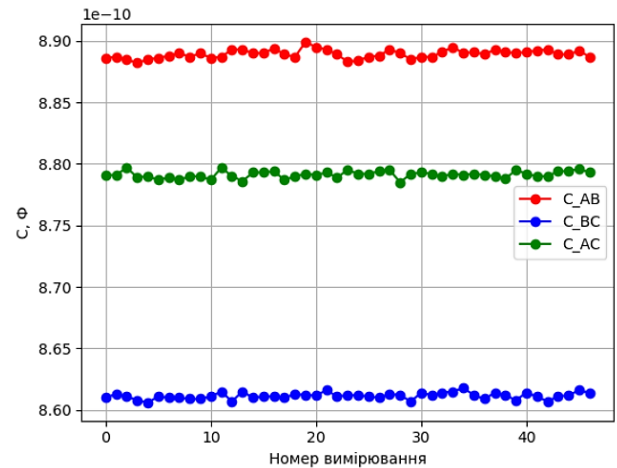


Рисунок 5 – Результати повторних вимірювань сукупних значень електричної ємності кабелю ААШВ при використанні схеми з'єднання металевих елементів «дві жили проти жили та оболонки» за частоти 10 кГц

Таблиця 1 – Сукупні та часткові ємності досліджуваного зразка силового кабелю за частоти 1 кГц

Схема з'єднання металевих елементів	Ємність, пФ	Шар ізоляції	Ємність, пФ
C_A	560.8	AB	106.18
C_B	562.8	BC	112
C_C	542.7	AC	101.3
$C_{A\ B}$	911.3	AG	353
$C_{B\ C}$	881.4	BG	344.6
$C_{A\ C}$	900.9	CG	329.3

Таблиця 2 – Сукупні та часткові ємності досліджуваного зразка силового кабелю за частоти 10 кГц

Схема з'єднання металевих елементів	Ємність, пФ	Шар ізоляції	Ємність, пФ
C_A	546.4	AB	103.7
C_B	550	BC	109.5
C_C	530	AC	98.6
$C_{A\ B}$	889	AG	344
$C_{B\ C}$	861	BG	337
$C_{A\ C}$	879	CG	322

Обґрунтування наведеної на рис. 1 схеми заміщення проводилось шляхом порівняння результатів вимірювання її ємності, проведених за різних значень опору резистора R_s , з аналітично розрахованими, що були отримані на основі наведених в таблицях 1 і 2 часткових ємностей. Так, для наведеної на рис. 1 схеми, у випадку $R_s \rightarrow 0$ потенціал жили C буде дорівнювати потенціалу заземленої оболонки. Враховуючи зазначену рівність потенціалів, часткові ємності C_{CB} та C_{CG} не будуть впливати на результати вимірювань а величина ємності буде визначатись паралельно з'єднаними частковими ємностями C_{AB} , C_{AC} та C_{AG} . Таким чином, за виконання умови $R_s \rightarrow 0$ тестова напруга вимірювача імітансу буде прикладена

до шару ізоляції між жилою A та з'єднаними між собою та оболонкою жилами B та C . Зазначений випадок повністю співпадає зі способом вимірювання сукупної ємності C_A , що використовується при вирішенні системи рівнянь (1). Таким чином, свідченням обґрунтованості застосування схеми заміщення на рис. 1 є рівність результатів вимірювань сукупних ємностей C_A , C_B , та C_C із відповідними результатами вимірювання ємності при застосуванні наведеної на рис. 1 схеми для випадку $R_s = 0$. В той же час, за достатньо високого значення опору R_s потенціал жили C буде відрізнятися від потенціалу заземленої оболонки. В такому випадку результати сукупних вимірювань ємності будуть визначатись частковими ємностями C_{CB} , C_{CG} а також ємностями C_{AB} , C_{AC} та C_{AG} . З метою наочного обґрунтування формули для розрахунку результатів вимірювань сукупного значення електричної ємності для наведеної на рис. 1 схеми з'єднання металевих елементів конструкції зазначена схема в розгорнутому вигляді представлена на рис. 6 [10].

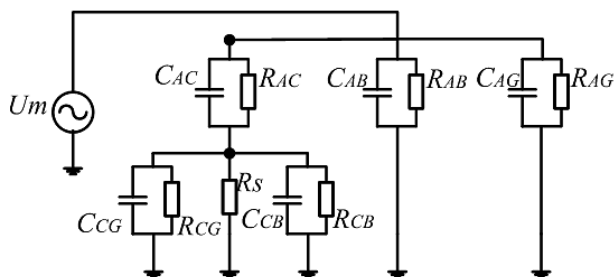


Рисунок 6 – Наведена на рис. 1 схема з'єднання металевих елементів конструкції кабелю в розгорнутому вигляді

Для наведеної на рис. 6 схеми, із врахуванням того, що величина опору R_s дозволяє забезпечити різницю потенціалів між жилою C та оболонкою, результати вимірювань сукупного значення електричної ємності C_{A_EF} може бути розраховане за формулою:

$$C_{A_EF} = C_{AB} + C_{AG} + C_{A_SP}; \quad (3)$$

де C_{A_SP} розраховується із використанням виразу:

$$C_{A_SP} = \frac{C_{AC}(C_{CB} + C_{CG})}{C_{AC} + C_{CB} + C_{CG}}; \quad (4)$$

При вимірюванні параметрів ізоляційного проміжку між жилами A і B жила C з'єднується з заземленою оболонкою кабелю, жила A з'єднується з оболонкою через резистор R_s а тестова напруга прикладається між жилою B та заземленою оболонкою кабелю. За виконання умови $R_s \neq 0$ сукупне значення ємності може бути розраховане за формулою:

$$C_{B_EF} = C_{BC} + C_{BG} + C_{B_SP}; \quad (5)$$

де C_{B_SP} розраховується за формулою:

$$C_{B_SP} = \frac{C_{AB}(C_{AG} + C_{AC})}{C_{AB} + C_{AG} + C_{AC}}; \quad (6)$$

При вимірюванні параметрів ізоляційного проміжку між жилами B і C жила A з'єднується з заземленою оболонкою, жила B заснується з оболонкою через резистор R_s а тестова напруга прикладається між жилою C та оболонкою кабелю. В такому випадку сукупна ємність C_{C_EF} може бути розрахована за формулою:

$$C_{C_EF} = C_{AC} + C_{CG} + C_{C_SP}; \quad (7)$$

де коефіцієнт C_{A_SP} розраховується із використанням виразу:

$$C_{B_SP} = \frac{C_{BC}(C_{AB} + C_{BG})}{C_{BC} + C_{AB} + C_{BG}}; \quad (8)$$

В таблицях 3 і 4 наведено результати аналітичного розрахунку сукупних ємностей за формулами (3–8), результати із вимірювання із застосуванням наведеної на рис. 1 схеми з'єднання металевих елементів конструкції кабелю.

Таблиця 3 – Результати вимірювань та аналітичного розрахунку сукупних ємностей досліджуваного зразка силового кабелю за частоти 1 кГц

Сукупне значення ємності	Результати розрахунку, пФ	Виміряне значення ємності за $R_s \neq 0$, пФ	Виміряне значення ємності за $R_s = 0$, пФ
C_{A_EF}	542	537	555
C_{B_EF}	542	536	556
C_{C_EF}	520.4	517	539.5

Таблиця 4 – Результати вимірювань та аналітичного розрахунку сукупних ємностей досліджуваного зразка силового кабелю за частоти 10 кГц

Сукупне значення ємності	Результати розрахунку, пФ	Виміряне значення ємності за $R_s \neq 0$, пФ	Виміряне значення ємності за $R_s = 0$ пФ
C_{A_EF}	528	526.5	545.7
C_{B_EF}	534	525	545
C_{C_EF}	508	507	528.8

Наведені в таблицях 3 і 4 результати вимірювань та розрахунків дають можливість зробити висновок про обґрунтованість застосування наведеної на рис. 1 схеми заміщення. Такі висновки можуть бути зроблені на основі порівняння наведених в таблиці 3 та 4 результатів вимірювань ємності за значення $R_s \neq 0$ із наведеними в цих таблицях, та аналітично розрахованими за формулами (3–8) значеннями. Так, за частоти 10 кГц розраховані значення C_{A_EF} та C_{C_EF} практично збігаються з наведеними в таблиці 4

результатами розрахунків. При цьому, найбільша різниця спостерігається для ємності C_{B_EF} , та складає 9 пФ. Для ємностей C_{A_EF} та C_{C_EF} різниця між результатами вимірювань та аналітичним розрахунком, відповідно, складає 1.5 пФ та 1 пФ. За частоти 1 кГц найбільша різниця між результатами вимірювань та результатами аналітичного розрахунку також спостерігається для ємності C_{B_EF} та складає 6 пФ. Для ємностей C_{A_EF} та C_{C_EF} різниця між результатами експерименту та розрахунком складає 5 пФ та 3.4 пФ. Порівняння наведених в таблицях 3 і 4 результатів вимірювань ємності за значення $R_s = 0$ із представленими в таблицях відповідними значеннями C_A , C_B , C_C також дозволяє зробити висновок про високу ступінь узгодження отриманих результатів.

Висновки. В статті наведено експериментальне обґрунтування розглянутої схеми заміщення трижильного силового кабелю з паперовою імпрегнованою ізоляцією для випадку резистивного заземлення однієї із жил кабелю, що використовується з метою вимірювання індивідуальних значень електричної ємності та тангенса кута діелектричних втрат шарів ізоляції між жилами кабелю. Отримані результати вимірювань сукупних значень електричної ємності демонструють високу ступінь узгодження із аналітичними розрахунками, що дозволяє зробити висновок про можливість практичного застосування розглянутої схеми заміщення кабелю.

Список літератури

1. СОУ-Н ЕЕ 20.302:2007. Норми випробування електрообладнання. Чинний від 2020-04-06. Вид. офіц. Київ.
2. ASTM D924-15. Standard Test Method for Dissipation Factor (or Power Factor) and Relative Permittivity (Dielectric Constant) of Electrical Insulating Liquids. Effective from 2023-12-25. Official edition. 8 p. DOI: <https://doi.org/10.1520/D0924-15>.
3. Diagnostics of high water content paper-oil transformer insulation based on the temperature and frequency dependencies of the loss tangent / P. Zukowski et al. *Energies*. 2022. Vol. 15, no. 8. 2813. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15082813>.
4. Dependence of dielectric loss tangent on the parameters of multilayer insulation materials cable / M. N. Dubyago et al. *Proceedings of the 2014 International Conference on Frontier of Energy and Environment Engineering (ICFEE 2014)*, Taiwan, 6–7 December 2014. London, 2015. P. 1003–1008.
5. Bezprozvannykh G. V., Moskvitin Y. S. Physical Processes of Aging and Assessment of the Technical Condition of Power Cables with Paper-Impregnated Insulation. 2023 *IEEE 4th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, Kharkiv, 2–6 October 2023. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1109/khpiweek61412.2023.10312975>.
6. Напрями удосконалення засобів моніторингу технічного стану силових кабельних ліній систем електропостачання військових аеродромів / Г. І. Лягушін та ін. *Системи озброєння і військова техніка*. 2021. № 2(66). С. 66–72. DOI: <https://doi.org/10.30748/soivt.2021.66.09>.
7. Москвитин Е. С. Методи контролю старіння паперово-просоченої ізоляції силових кабелів середньої напруги : дис. ... канд. техн. наук : 05.11.13. Харків, 2012. 185 с.
8. Analysis of low-frequency dielectric loss of XLPE cable insulation based on extended Debye model / X. Cheng et al. *AIP Advances*. 2021. Vol. 11, no. 8. 085103. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0060939>.
9. Беспрозванных А.В., Москвитин Е.С. Число двойных перегибов как индикатор степени старения кабельных бумаг. *Электротехника и Электромеханика*. 2011. №. 3. С. 62–66.
10. Kostiukov I., Lytvynenko S., Lavrinenko O. Mathematical model for the evaluation of dielectric properties of inner layers of insulation in three-core belted cables. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2023. Vol. 1, no. 12. P. 179–182. DOI: <https://doi.org/10.15199/48.2023.12.31>.
11. Костюков І. О. Особливості оцінювання часткових ємностей ізоляції трьохжильних силових кабелів із застосуванням сукупних вимірювань. *Український метрологічний журнал*. 2021. № 1. С. 15–20. DOI: <https://doi.org/10.24027/2306-7039.1.2021.228201>.

References

1. Normy vyprobuвання elektroobladnannia [Testing standards for electrical equipment], SOU-N EE 20. 302:2007Vidkryte aktsionerne tovarystvo z pusku, nalahodzhennia udoskonalennia tekhnolohii ta ekspluatatsii elektrostantsii i merezh «LvivORHRES», Kyiv. (in Ukrainian)
2. Standard Test Method for Dissipation Factor (Or Power Factor) and Relative Permittivity (Dielectric Constant) of Electrical Insulating Liquids, ASTM D924-15, Advancing Standards Transforming Markets(ASTM), doi: <https://doi.org/10.1520/D0924-15>
3. P. Zukowski, P. Rogalski, V. Bondariev, and M. Sebok, “Diagnostics of high water content paper-oil transformer insulation based on the temperature and frequency dependencies of the loss tangent”, *Energies*, vol. 15, no. 8, Apr. 2022, Art. no. 2813, doi: <https://doi.org/10.3390/en15082813>
4. M. N. Dubyago, N. Poluyanovich, D. Burkov, and I. Tibeyko, “Dependence of dielectric loss tangent on the parameters of multilayer insulation materials cable”, in *Proceedings of the 2014 International Conference on Frontier of Energy and Environment Engineering (ICFEE 2014)*, Taiwan, Dec. 6–7, 2014. London: CRC Press, 2015, pp. 1003–1008.
5. G. V. Bezprozvannykh and Y. S. Moskvitin, “Physical processes of aging and assessment of the technical condition of power cables with paper-impregnated insulation”, in *2023 IEEE 4th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, Kharkiv, Ukraine, Oct. 2–6, 2023. IEEE, 2023, doi: <https://doi.org/10.1109/khpiweek61412.2023.10312975>
6. H. Lahutin, S. Khabosha, V. Perepelytsya, I. Kulinich, and I. Soldatenko, “Directions of improving the means of monitoring the technical condition of power cable lines of military airfields power supply systems”, *Systems of Arms and Military Equipment*, no. 2(66), pp. 66–72, May 2021, doi: <https://doi.org/10.30748/soivt.2021.66.09> (in Ukrainian) (in Russian)
7. Ye. S. Moskvitin, “Metody kontroliu starinnia paperoovo-prosochenoi izoliatsii sylovykh kabeliv serednoi napruhy [Methods for controlling the aging of paper-impregnated insulation of medium-voltage power cables]”, dissertation of Candidate of Technical Sciences, Nat. Tech. Univ. "Kharkiv Polytech. Inst.," Kharkiv, 2012.
8. X. Cheng, G. Ye, H. Sun, T. Li, and C. Sun, “Analysis of low-frequency dielectric loss of XLPE cable insulation based on extended Debye model”, *AIP Advances*, vol. 11, no. 8, Aug. 2021, Art. no. 085103, doi: <https://doi.org/10.1063/5.0060939>
9. A. V. Bezprozvannykh and E. S. Moskvitin, “Double-kink number as an indicator of degree of cable paper ageing”, *Electrical Engineering & Electromechanics*, no. 3, pp. 62–66, 2011. (in Russian)
10. I. Kostiukov, S. Lytvynenko, and O. Lavrinenko, “Mathematical model for the evaluation of dielectric properties of inner layers of insulation in three-core belted cables”, *Przegląd Elektrotechniczny*, vol. 1, no. 12, pp. 179–182, Dec. 2023, doi: <https://doi.org/10.15199/48.2023.12.31>
11. I. Kostiukov, “Particular properties of estimation of partial capacitances of insulation of three core power cables by applying aggregate measurements”, *Ukrainian Metrological Journal*, no. 1, pp. 15–20, Mar. 2021, doi: <https://doi.org/10.24027/2306-7039.1.2021.228201> (in Ukrainian)

Надійшла (received) 23.06.2025

KOSTIUKOV IVAN ✉ – Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Theoretical Electrical Engineering, National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8923-0579>; e-mail: iakostiukow@gmail.com.

KULYK OLEKSII – Doctor of Philosophy (PhD), Senior Lecturer of the Department of Electric Power Transmission, National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2545-6314>; e-mail: oleksii.kulyk@khp.edu.ua.

LYTVYENKO SVITLANA – Doctor of Philosophy (PhD), Assistant Professor of the Department of Theoretical Electrical Engineering, National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0818-2470>; e-mail: lytvynenko.svitlana@khp.edu.ua.

KUBRYK BORYS – Candidate of Technical Sciences (PhD), Docent, Assistant Professor of the Department of Theoretical Electrical Engineering, National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8327-0350>; e-mail: borys.kubryk@khp.edu.ua.

LAVRINENKO OLGA – Candidate of Historical Sciences (PhD), Assistant Professor of the Department of Theoretical Electrical Engineering, National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5274-3955>; e-mail: Lavrinenko.Olga@khp.edu.ua.

EXPERIMENTAL JUSTIFICATION OF THE SCHEME FOR REPLACING A THREE-CORE POWER CABLE WITH PAPER IMPREGNATED INSULATION FOR THE CASE OF RESISTIVE GROUNDING OF ONE OF THE CORES

The article is devoted to the experimental justification of the equivalent circuit of a three-core power cable with paper impregnated insulation in a common metal sheath in the case of resistive grounding of one of the cable cores, which are used when applying one of the methods of measuring individual values of the electric capacitance and the tangent of the angle of dielectric loss of the insulation layers between the cores of the power cable. The experimental justification was based on comparing the results of calculating the total values of the electric capacitance for the considered equivalent circuit with the measurement results obtained using an immittance meter with 2 terminals at two different frequencies of the applied test voltage. When calculating the total values of the capacitance for the circuit with resistive grounding of one of the cores, the values of partial capacitances previously obtained using known methods of surveying three-core power cables based on the use of total measurements were used. Comparison of the results of calculating the total values of the electrical capacitance for the equivalent schemes of cable insulation with resistive grounding of one of the cores with the measurement results showed the possibility of using the equivalent scheme considered in the article. The results obtained can be used to monitor the technical condition of the insulation of three-core power cables according to the parameters of the dielectric loss tangent and electrical capacitance. The application of the control method considered in the article does not require taking into account the influence of the additional component of parasitic inductance in the measurement scheme on the results of determining the parameters of the dielectric and is an alternative to the known control methods based on the use of direct and total measurements.

Keywords: diagnostics of insulation; direct measurements; aggregate measurements; partial capacitances; system of linear algebraic equations.

КОСТЮКОВ ІВАН ОЛЕКСАНДРОВИЧ ✉ – доктор технічних наук, завідувач кафедри теоретичних основ електротехніки, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8923-0579>; e-mail: iakostiukow@gmail.com.

ФОЩІЙ МАРІЯ ДМИТРІВНА – старший викладач кафедри менеджменту, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1555-3110>; e-mail: Mariia.Foshchii@khp.edu.ua.

СИЗОВ ЄВГЕНІЙ ВІКТОРОВИЧ – аспірант кафедри теоретичних основ електротехніки, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; e-mail: sizovevgeniy94@gmail.com.

СПОСОБИ ФОРМУВАННЯ СИСТЕМ РІВНЯНЬ ПРИ ВИЗНАЧЕННІ ПАРАМЕТРІВ ДІЕЛЕКТРИЧНОЇ АБСОРБЦІЇ ІЗОЛЯЦІЇ ТРИЖИЛЬНИХ СИЛОВИХ КАБЕЛІВ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ СУКУПНИХ ВИМІРЮВАНЬ

Стаття присвячена огляду способів формування систем рівнянь при визначенні часткових ємностей та індивідуальних значень тангенса кута діелектричних втрат шарів ізоляції трижильних силових кабелів з паперовою імпрегнованою ізоляцією в спільній металевій оболонці. Наведено способи з'єднання металевих елементів конструкції силового кабелю при вимірюванні сукупних значень ємності та тангенса кута діелектричних втрат, що використовуються при формуванні систем рівнянь. Проведено аналітичний огляд найбільш поширених методів контролю, що використовуються при оцінюванні ступеню старіння паперової ізоляції трижильних силових кабелів. Наведено порівняльний аналіз основних особливостей методів визначення індивідуальних значень електричної ємності та тангенса кута діелектричних втрат із застосуванням прямих та сукупних вимірювань. Показано, що із врахуванням необхідності проведення контролю в широкому частотному діапазоні, зменшується ефективність застосування існуючих способів усунення впливу паразитних ємностей на результати вимірювань. При застосуванні автокомпенсаційних перетворювачів імпедансу в напругу таке зменшення пов'язано із зниженням коефіцієнта підсилення операційного підсилювача а у випадку застосування вимірювачів імітансу з трьома клемми з виникненням резонансних явищ в об'єкті контролю внаслідок збільшення його паразитної індуктивності через застосування додаткової клемми вимірювача імітансу. Запропоновано спосіб оцінювання індивідуальних значень тангенса кута діелектричних втрат із застосуванням сукупних вимірювань, що полягає у вимірюванні провідності ізоляційних проміжків, що, після попереднього визначення часткових ємностей ізоляції, дозволяє визначити її тангенс кута діелектричних втрат шляхом застосування відповідного виразу для неідеального конденсатора з діелектричними втратами.

Ключові слова: діагностика ізоляції; діелектричні втрати; атомні станції; вимірювання імпедансу; метод найменших квадратів.

Вступ. Трижильні силові кабелі з паперовою імпрегнованою ізоляцією в спільній металевій оболонці знаходять широке застосування в енергомережах України. Конструктивно такі силові кабелі мають фазну та поясну ізоляцію та виготовляються з сегментними жилами, що дозволяє забезпечити суттєву економію матеріалів та високу компактність конструкції, проте обмежує можливість їх застосування в кабельних лініях передачі електричної енергії вище за 10 кВ. Таке обмеження зумовлене виникненням тангенціальної складової напруженості електричного поля, що призводить до прискореного старіння паперової ізоляції [1]. Значна кількість силових кабелів зазначеного типу використовується в енергомережах із суттєвим перевищенням встановленого терміну експлуатації. Так, в експлуатації все ще можуть знаходитись силові кабелі з напрацюванням від 25 до 59 років [2]. В той же час, повна заміна кабелів із перевищенням терміном напрацювання на відповідні аналоги з не зістареною під дією експлантаційних факторів ізоляцією є суттєво ускладненою та пов'язана із значними економічними витратами. Зазначена обставина визначає актуальність вирішення задачі забезпечення контролю технічного стану ізоляції трижильних силових кабелів в спільній металевій оболонці. Ця задача також є важливою при оцінюванні ступеню старіння силових кабелів, що забезпечують електропостачання систем охолодження реакторів атомних електростанцій. При цьому,

необхідність забезпечення контролю технічного стану силових кабелів на атомних електростанціях набуває особливої актуальності із врахуванням тенденції до збільшення терміну експлуатації енергоблоків на строк до 60–80 років [3], що визначає додаткове навантаження на ізоляцію силових кабелів.

На практиці в більшості випадків контроль технічного стану силових кабелів проводять із застосуванням методів електричних вимірювань, що дозволяють визначити залежні від ступеню старіння електрофізичні параметри ізоляції. При застосуванні абсорбційних методів контролю в якості таких параметрів досить часто використовуються індекс поляризації та коефіцієнт абсорбції. Зазначені коефіцієнти дозволяють визначити ступінь зволоження ізоляції та фактично представляють собою коефіцієнти, що характеризують швидкість зміни опору діелектрика після моменту прикладання постійної випробувальної напруги. Такі параметри ізоляції можуть бути виміряні із застосуванням сучасних цифрових мегомметрів (таких як UNI-T UT513C). Досить розповсюдженим на практиці також є метод відновлюваної напруги. Цей метод також належить до групи абсорбційних методів та полягає в тривалому заряді електричної ємності досліджуваного об'єкта контролю від джерела постійної напруги з наступним її короткочасним розрядом, після якого проводять вимірювання напруги, що відновлюється на електродах об'єкта контролю. В такому випадку в

© І. О. Костюков, М. Д. Фошій, Є. В. Сизов, 2025



Ця робота ліцензується відповідно до **Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)**
Конфлікт інтересів: Автори заявили про відсутність конфлікту

якості чутливих до ступеню старіння ізоляції критеріїв найчастіше використовують відношення зарядної напруги до максимального значення відновлюваної напруги а також час, за якого відновлювана напруга приймає максимальне значення. Встановлено, що старіння ізоляції супроводжується зменшенням часу, за якого відновлювана напруга досягає свого максимального значення, при цьому відношення зарядної напруги до максимального значення відновлюваної спочатку збільшується а потім – зменшується [4]. Крім перелічених абсорбційних методів контролю на практиці часто застосовуються класичні методи контролю, що полягають у вимірюванні електричної ємності та тангенса кута діелектричних втрат ($\tan\delta$) ізоляції. Зазначені параметри широко використовуються в практиці діелектричної спектроскопії при дослідженні процесів поляризації та електропровідності в діелектриках. Спостереження за залежністю $\tan\delta$ від рівня прикладеної до діелектрика напруги є широко відомим непрямым методом оцінювання наявності часткових розрядів в ізоляції. Електрична ємність та $\tan\delta$ також є досить чутливими до ступеню зволоження ізоляції. Крім того, встановлено, що $\tan\delta$ демонструє з механічними характеристиками паперової ізоляції. При дослідженнях на частоті 100 кГц також встановлена кореляція між рівнем $\tan\delta$ та відносною видовженням при розриві для етилен-пропіленової гумової ізоляції.

Трижильні силові кабелі з паперовою імпрегнованою ізоляцією містять 6 ізоляційних проміжків, з яких 3 утворені шарами ізоляції між жилами силового кабелю а 3 інші – шарами ізоляції між його жилами та оболонкою. При контролі ізоляції таких кабелів необхідним є визначення індивідуальних параметрів діелектрика між металевими елементами конструкції. Доцільність таких вимірювань викликана необхідністю виявлення саме локальних ділянок застареної ізоляції, оскільки при вимірюваннях її сукупних параметрів ділянки діелектрика з відносно задовільними діелектричними властивостями здатні приховувати старіння ділянок ізоляції із явними ознаками деградації. Таким чином, при контролі ізоляції трижильних силових кабелів за параметрами електричної ємності та $\tan\delta$ виникає задача визначення індивідуальних параметрів кожного з шарів діелектрика між металевими елементами конструкції. На практиці різниця між індивідуальними значеннями ємності та $\tan\delta$ може бути зумовлена як експлуатаційними факторами (наприклад, нерівномірне навантаження фаз внаслідок асиметрії), так і недосконалою технологією виробництва.

Задача визначення індивідуальних значень електричної ємності та $\tan\delta$ шарів ізоляції між металевими елементами конструкції в трижильних силових кабелях може бути вирішена із застосуванням прямих, або сукупних вимірювань. Враховуючи наявність в конструкції кабелю декількох металевих елементів, та відповідне існування багатьох паразитних ємнісних зв'язків досліджуваного шару ізоляції, при застосуванні прямих вимірювань необхідне використання вимірювачів імітансу, що

здатні забезпечити повне усунення небажаного впливу паразитних ємностей на результати контролю. Конструктивно такі вимірювачі імітансу повинні давати можливість забезпечувати трьохзажимне підключення досліджуваного зразка силового кабелю. В цьому випадку дві клема використовуються для подачі випробувальної напруги а третя клема – для відведення паразитних ємнісних струмів. Інший спосіб усунення паразитних ємностей полягає в застосуванні вимірювачів імітансу на основі автокомпенсаційних перетворювачів, що досить часто використовуються в практиці вимірювання біоімпедансу. Такі перетворювачі представляють собою інвертуючий підсилювач, що завдяки можливості підтримувати близьку до нуля різницю потенціалів на своїх інвертуючому та неінвертуючому входах дозволяє практично усунути вплив паразитних ємностей на результати вимірювання електричної ємності та $\tan\delta$. В той же час, враховуючи необхідність проведення вимірювань в широкому частотному діапазоні, застосування таких конструктивних рішень вимагає врахування можливого впливу частоти на їх ефективність. Так, застосування третьої клема вимірювача імітансу збільшує паразитну індуктивність схеми вимірювання, що, особливо при вимірюваннях відносно великих ємностей об'єкта контролю, змушує враховувати можливість впливу резонансних явищ на результати вимірювань. В той же час, збільшення частоти супроводжується зменшенням коефіцієнта підсилення операційного підсилювача, використаного при побудові автокомпенсаційного перетворювача, що зменшує його здатність забезпечувати усунення впливу паразитної ємності на результати контролю.

При визначенні індивідуальних параметрів шарів ізоляції між металевими елементами конструкції в трижильних силових кабелях альтернативою застосуванню прямих вимірювань є сукупні вимірювання [5, 6]. В цьому випадку можливе застосування вимірювачів імітансу із 2 клемми. Невідомі параметри ізоляції визначають шляхом вирішення систем рівнянь з правою частиною, яка містить результати сукупних вимірювань електричної ємності та $\tan\delta$, що визначені за різних способів з'єднання металевих елементів конструкції кабелю. При цьому коефіцієнти системи рівнянь визначають відсутність, чи наявність внеску того чи іншого шару ізоляції в результат сукупного вимірювання ємності та $\tan\delta$. З метою уникнення небажаного впливу можливих похибок вимірювання сукупних величин на результати розрахунку індивідуальних значень ємності та $\tan\delta$ замість безпосереднього вирішення системи рівнянь доцільним є мінімізація похибки вирішення перевизначеної системи із застосуванням методу найменших квадратів. Застосування сукупних вимірювань дозволяє уникнути необхідності врахування впливу частоти прикладеної напруги на ефективність застосування технічних рішень, що дозволяють усунути вплив паразитних ємностей у випадку прямих вимірювань параметрів ізоляції. Крім того, можливість проведення вимірювань із використанням вимірювачів імітансу із 2 клемми,

суттєво спрощує процедуру контролю за рахунок можливості застосування більш розповсюдженого метрологічного забезпечення. В той же час, до недоліків такого підходу необхідно віднести підвищену трудомісткість вимірювань та обробки їх результатів. Зазначений недолік пов'язаний з тим, в цьому випадку процедура контролю передбачає необхідність вимірювань сукупних значень ємності та $\text{tg}\delta$ за різних способів з'єднання металевих елементів конструкції силового кабелю із наступним вирішенням системи рівнянь для розрахунку індивідуальних параметрів діелектриків між металевими елементами конструкції.

Мета статті полягає в аналізі способів формування систем рівнянь при визначенні індивідуальних параметрів діелектричної абсорбції ізоляції трижильних силових кабелів із застосуванням сукупних вимірювань.

Формування систем рівнянь при визначенні часткових ємностей ізоляції трижильних силових кабелів в спільній металевій оболонці. Способи формування систем рівнянь для визначення часткових ємностей та індивідуальних значень $\text{tg}\delta$ шарів ізоляції між металевими елементами конструкції засновані на аналізі властивостей наведеної на рис. 1 схеми заміщення трижильного силового кабелю [7].

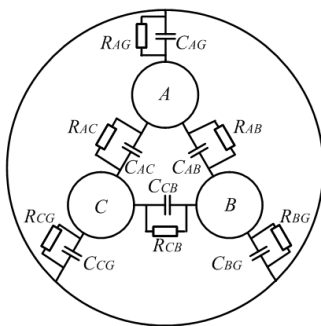


Рисунок 1 – Схема заміщення трижильного силового кабелю, що враховує ємнісні зв'язки між металевими елементами конструкції та діелектричні втрати на електропровідність, поляризацію та часткові розряди у відповідних шарах ізоляції:

C_{AB}, C_{CB}, C_{AC} – невідомі часткові ємності між жилами силового кабелю,

C_{AG}, C_{CG}, C_{BG} – невідомі часткові ємності між жилами та оболонкою кабелю,

R_{AB}, R_{CB}, R_{AC} – електричні опори, що зумовлені діелектричними втратами в шарах ізоляції між жилами кабелю,

R_{AG}, R_{BG}, R_{CG} – електричні опори, що зумовлені діелектричними втратами в шарах ізоляції між жилами та оболонкою кабелю

Оскільки вимірювання параметрів ізоляції проводяться в режимі холостого ходу, наведена на рис. 1 схема заміщення не містить індуктивних параметрів та електричних опорів, що зумовлені втратами в металевих елементах конструкції кабелю. При вимірюваннях на високих частотах, внаслідок роботи досліджуваного зразка в режимі лінії з розподіленими параметрами, можливе виникнення резонансних явищ в досліджуваному об'єкті контролю

та відповідний небажаний вплив індуктивності кабелю на результати вимірювань. Такий вплив полягає у збільшенні електричної ємності із зростанням частоти прикладеної до діелектрика напруги. Оскільки в досить широкому частотному діапазоні таке збільшення електричної ємності не співпадає із частотною залежністю відносної діелектричної проникності паперової ізоляції, вплив паразитної індуктивності призводить до похибок вимірювання сукупних значень ємності та $\text{tg}\delta$ а також до неточних оцінок індивідуальних параметрів діелектрика між металевими елементами конструкції кабелю.

Вимірювання сукупних значень ємності та $\text{tg}\delta$ проводять із застосуванням наступних схем з'єднання металевих елементів конструкції кабелю [8–10]:

- «жила проти двох інших жил та оболонки». При застосуванні цієї схеми з'єднання випробувальна напруга вимірювача імітансу послідовно прикладається до шару ізоляції між однією із жил кабелю та з'єднаними між собою та оболонкою двома іншими жилами. В цьому випадку вимірюються сукупні значення ємності: C_A, C_B, C_C та рівні $\text{tg}\delta$: $\text{tg}\delta_A, \text{tg}\delta_B, \text{tg}\delta_C$. В таких позначеннях C_A, C_B, C_C та $\text{tg}\delta_A, \text{tg}\delta_B, \text{tg}\delta_C$ відповідно, позначають сукупні значення ємності та $\text{tg}\delta$, виміряні при подачі тестової напруги між жилою A, та з'єднаними між собою та оболонками жилами B та C, при подачі тестової напруги між жилою B, та з'єднаними між собою та оболонками жилами A та C а також при подачі напруги між жилою C, та з'єднаними між собою жилами A та B;

- «дві жили проти жили та оболонки». В цьому випадку тестова напруга прикладається між з'єднаними між собою двома жилами та з'єднаною з оболонкою третьою жилою. При застосуванні цієї схеми проводять вимірювання сукупних значень: $C_{A_B}, C_{B_C}, C_{A_C}$, та $\text{tg}\delta_{A_B}, \text{tg}\delta_{B_C}, \text{tg}\delta_{A_C}$. В таких позначеннях C_{A_B} та $\text{tg}\delta_{A_B}$ – сукупні значення ємності та $\text{tg}\delta$, виміряні при подачі тестової напруги до ізоляції між з'єднаними між собою жилами A і B та з'єднаною з оболонкою жилою C, C_{B_C} та $\text{tg}\delta_{B_C}$ – сукупні значення ємності та $\text{tg}\delta$, що вимірюються у випадку подачі тестової напруги до шару ізоляції між з'єднаними між собою жилами B і C та з'єднаною з оболонкою жилою A, C_{A_C} та $\text{tg}\delta_{A_C}$ – сукупні значення ємності та $\text{tg}\delta$, що вимірюються у випадку подачі тестової напруги до шару ізоляції між з'єднаними між собою жилами A і C та з'єднаною з оболонкою жилою B;

- «три жили проти оболонки». При застосуванні цієї схеми вимірюються параметри C_{ABC_G} та $\text{tg}\delta_{ABC_G}$. В цьому випадку тестова напруга вимірювача імітансу прикладається до шару ізоляції між з'єднаними між собою трьома жилами кабелю та його оболонкою.

Застосування всіх 3 схем з'єднання дозволяє визначити 7 сукупних значень електричної ємності та 7 відповідних значень $\text{tg}\delta$. Враховуючи, що у

відповідності з наведеною на рис. 1 схемою заміщення при контролі виникає необхідність вимірювання індивідуальних параметрів діелектрика для 6 ізоляційних проміжків, в такому випадку визначення часткових ємностей та відповідних рівнів $\text{tg}\delta$ проводять шляхом мінімізації середньоквадратичної похибки вирішення перевизначеної системи рівнянь із застосуванням методу найменших квадратів. При оцінюванні часткових ємностей із застосуванням методу найменших квадратів система рівнянь може бути записана у вигляді:

$$\mathbf{A}_1 \mathbf{c} = \mathbf{b}_1; \quad (1)$$

де $\mathbf{b}_1 = [C_A, C_B, C_C, C_{A_B}, C_{B_C}, C_{A_C}, C_{ABC_G}]^T$ – вектор результатів вимірювань сукупних значень електричної ємності;

$\mathbf{c} = [C_{AB}, C_{BC}, C_{AC}, C_{AG}, C_{BG}, C_{CG}]^T$ – вектор, що містить невідомі часткові ємності силового кабелю;

$\mathbf{A}_1$ – матриця, що визначає відсутність, чи наявність внеску того чи іншого ізоляційного проміжку в результат вимірювання сукупного значення електричної ємності. Враховуючи, що при застосуванні описаних схем з'єднання металевих елементів конструкції невідомі часткові ємності, що визначають вектор результатів сукупних вимірювань $\mathbf{b}_1$, з'єднані паралельно, матриця $\mathbf{A}_1$ може бути визначена у відповідності із виразом:

$$\mathbf{A}_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}. \quad (2)$$

При вирішенні системи (1) із використанням методу найменших квадратів замість її прямого вирішення розглядається система рівнянь:

$$\mathbf{Bc} = \mathbf{u}; \quad (3)$$

де $\mathbf{B} = \mathbf{A}_1^T \mathbf{A}_1$, $\mathbf{u} = \mathbf{A}_1^T \mathbf{b}_1$.

Нормальна система рівнянь (3) може бути вирішена із застосуванням будь-якого методу, при цьому її рішення забезпечує мінімізацію середньоквадратичної похибки вирішення системи (1).

Формування систем рівнянь при визначенні індивідуальних значень $\text{tg}\delta$ шарів ізоляції трижильних силових кабелів в спільній металевій оболонці. Визначення часткових ємностей ізоляції трижильних силових кабелів дає можливість розрахунку рівнів $\text{tg}\delta$ для кожного з шарів ізоляції в трижильних кабелях. Таке визначення може бути проведене двома різними способами. Перший спосіб полягає в застосуванні результатів теорії фізики діелектриків, що дозволяють встановити співвідношення для ефективного значення $\text{tg}\delta$

декількох з'єднаних паралельно конденсаторів для випадку, коли відомі значення ємності та $\text{tg}\delta$ кожного з конденсаторів. Так, для двох паралельно з'єднаних конденсаторів з параметрами C_1 , C_2 та $\text{tg}\delta_1$, $\text{tg}\delta_2$ ефективне значення $\text{tg}\delta_e$ може бути розраховане за формулою [11]:

$$\text{tg}\delta_e = \frac{C_1}{C_1 + C_2} \text{tg}\delta_1 + \frac{C_2}{C_1 + C_2} \text{tg}\delta_2. \quad (4)$$

В такому випадку при застосуванні 3 схем обстеження «жила проти двох інших жил та оболонки» та 3 схем обстеження «дві жили проти жили та оболонки» система рівнянь відносно невідомих індивідуальних значень $\text{tg}\delta$ кожного з шарів ізоляції може бути записана у вигляді [8]:

$$\mathbf{T} \cdot \mathbf{d} = \mathbf{t}; \quad (5)$$

де $\mathbf{t} = [\text{tg}\delta_A, \text{tg}\delta_B, \text{tg}\delta_C, \text{tg}\delta_{A_B}, \text{tg}\delta_{B_C}, \text{tg}\delta_{A_C}]^T$ – вектор результатів вимірювань сукупних значень $\text{tg}\delta$;

$\mathbf{d} = [\text{tg}\delta_{AB}, \text{tg}\delta_{BC}, \text{tg}\delta_{AC}, \text{tg}\delta_{AG}, \text{tg}\delta_{BG}, \text{tg}\delta_{CG}]^T$ – вектор, що містить невідомі часткові ємності силового кабелю;

$\mathbf{T}$ – матриця, коефіцієнти якої враховують внесок певного шару ізоляції в результат вимірювання сукупного значення $\text{tg}\delta$, яка визначаються у відповідності з виразом:

$$\mathbf{T} = \begin{pmatrix} a_1 & 0 & a_2 & a_3 & 0 & 0 \\ a_4 & a_5 & 0 & 0 & a_6 & 0 \\ 0 & a_7 & a_8 & 0 & 0 & a_9 \\ 0 & a_{10} & a_{11} & a_{12} & a_{13} & 0 \\ a_{14} & 0 & a_{15} & 0 & a_{16} & a_{17} \\ a_{18} & a_{19} & 0 & a_{20} & 0 & a_{21} \end{pmatrix}; \quad (6)$$

де всі коефіцієнти $a_1 \dots a_{21}$, аналогічно до залежних від відношення ємностей параметрів записаного для двох конденсаторів виразу (4), представляють собою вагові коефіцієнти, що враховують внесок певної часткової ємності в сукупне значення $\text{tg}\delta$ та, із використанням векторної форми запису, можуть бути визначені за формулами [8]:

$$\mathbf{a}_{1-3} = \frac{1}{C_{AB} + C_{AC} + C_{AG}} \cdot \mathbf{C}_{1-3}; \quad (7)$$

$$\mathbf{a}_{4-6} = \frac{1}{C_{AB} + C_{BC} + C_{BG}} \cdot \mathbf{C}_{4-6}; \quad (8)$$

$$\mathbf{a}_{7-9} = \frac{1}{C_{BC} + C_{AC} + C_{CG}} \cdot \mathbf{C}_{7-9}, \quad (9)$$

$$\mathbf{a}_{10-13} = \frac{1}{C_{BC} + C_{AC} + C_{AG} + C_{BG}} \cdot \mathbf{C}_{10-13}, \quad (10)$$

$$\mathbf{a}_{14-17} = \frac{1}{C_{AB} + C_{AC} + C_{BG} + C_{CG}} \cdot \mathbf{C}_{14-17}, \quad (11)$$

$$\mathbf{a}_{18-21} = \frac{1}{C_{AB} + C_{BC} + C_{AG} + C_{CG}} \cdot \mathbf{C}_{18-21}, \quad (12)$$

де вектори $\mathbf{a}_{1-3} \dots \mathbf{a}_{18-21}$ визначаються за виразами:

$$\begin{aligned} \mathbf{a}_{1-3} &= [a_1, a_2, a_3], \\ \mathbf{a}_{4-6} &= [a_4, a_5, a_6], \\ \mathbf{a}_{7-9} &= [a_7, a_8, a_9], \\ \mathbf{a}_{10-13} &= [a_{10}, a_{11}, a_{12}, a_{13}], \\ \mathbf{a}_{14-17} &= [a_{14}, a_{15}, a_{16}, a_{17}], \\ \mathbf{a}_{18-21} &= [a_{18}, a_{19}, a_{20}, a_{21}], \end{aligned}$$

а вектори $\mathbf{C}_{1-3} \dots \mathbf{C}_{18-21}$ визначаються у відповідності з виразами:

$$\begin{aligned} \mathbf{C}_{1-3} &= [C_{AB}, C_{AC}, C_{AG}], \\ \mathbf{C}_{4-6} &= [C_{AB}, C_{BC}, C_{BG}], \\ \mathbf{C}_{7-9} &= [C_{BC}, C_{AC}, C_{CG}], \\ \mathbf{C}_{10-13} &= [C_{BC}, C_{AC}, C_{AG}, C_{BG}], \\ \mathbf{C}_{14-17} &= [C_{AB}, C_{AC}, C_{BG}, C_{CG}], \\ \mathbf{C}_{18-21} &= [C_{AB}, C_{BC}, C_{AG}, C_{CG}]. \end{aligned}$$

Вирішення системи рівнянь (5) дозволяє визначити індивідуальні значення $\tan \delta$ для кожного з шарів ізоляції для схеми заміщення на рис. 1.

Альтернативний шлях визначення індивідуальних значень $\tan \delta$ полягає у вимірюванні зумовлених діелектричними втратами опорів $R_{AB}, R_{CB}, R_{AC}, R_{AG}, R_{BG}, R_{CG}$ для наведеної на рис. 1 схеми заміщення силового кабелю. Враховуючи, що зазначені параметри, так само як електрична ємність та $\tan \delta$, можуть бути виміряні із використанням сучасних вимірювачів імітансу а також паралельне з'єднання шарів ізоляції при застосуванні описаних схем з'єднання металевих елементів конструкції, система рівнянь для провідності у випадку застосування 3 схем «жила проти двох інших жил та оболонки» та 3 схем «дві жили проти жили та оболонки» може бути записана у вигляді:

$$\mathbf{G} \cdot \mathbf{g} = \mathbf{p}; \quad (13)$$

де $\mathbf{p} = [R_A^{-1}, R_B^{-1}, R_C^{-1}, R_{A-B}^{-1}, R_{B-C}^{-1}, R_{A-C}^{-1}]^T$ – вектор, що залежить від результатів вимірювань сукупних значень опору ізоляції;

$\mathbf{g} = [G_{AB}, G_{BC}, G_{AC}, G_{AG}, G_{BG}, G_{CG}]^T$ – вектор, що містить невідомі провідності шарів ізоляції силового кабелю;

$\mathbf{G}$ – матриця, коефіцієнти якої визначають наявність, чи відсутність внеску того, чи іншого шару ізоляції в результат сукупного вимірювання складових вектору $\mathbf{p}$, та які визначаються у відповідності з виразом:

$$\mathbf{G} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (14)$$

Вирішення системи рівнянь (13) дозволяє визначити невідомі провідності та опори $R_{AB}, R_{CB}, R_{AC}, R_{AG}, R_{BG}, R_{CG}$ для наведеної на рис. 1 схеми заміщення. Такий розрахунок, після попереднього визначення часткових ємностей силового кабелю, дозволяє розрахувати індивідуальне значення $\tan \delta$ кожного шару ізоляції у відповідності із формулою [12]:

$$\tan \delta = \frac{1}{\omega CR}; \quad (15)$$

де ω – кутова частота прикладеної до діелектрика напруги;

C – часткова ємність певного шару ізоляції, що визначена шляхом вирішення системи рівнянь (1);

R – зумовлений діелектричними втратами електричний опір певного шару ізоляції, що визначається на основі вирішення системи рівнянь (13).

Висновки. В статті розглянуто найбільш поширені способи формування систем рівнянь при визначенні часткових ємностей та індивідуальних значень тангенса кута діелектричних втрат шарів ізоляції в трижильних силових кабелях з паперовою імпрегнованою ізоляцією в спільній металевій оболонці. Запропоновано альтернативний спосіб визначення індивідуальних значень тангенса кута діелектричних втрат, що полягає в розрахунку електропровідності шарів ізоляції після вимірювання сукупних значень її опору змінному струму, що, після попереднього визначення часткових ємностей, дає можливість розрахунку тангенса кута діелектричних втрат шляхом застосування відповідного виразу для неідеального конденсатора з діелектричними втратами.

Список літератури

1. Силові кабелі низької та середньої напруги. Конструювання, технологія, якість / В. П. Карпушенко та ін. Харків: Регіон-інформ, 2020. 376 с.
2. Диагностика кабельных линий энергосистем по тангенсу угла диэлектрических потер и постоянной времени саморазряда бумажно-пропитанной изоляции / Б. Г. Набока та ін. *Електротехніка і електромеханіка*. 2011. № 2. С. 65–70.
3. Безпрозванных Г. В., Москвитин Е. С. Стратегия управления старением кабелей атомных электрических станций. *Энергозбереження. Енергетика. Енергоаудит*. 2023. № 11-12(177-178). С. 21–33. DOI: <https://doi.org/10.20998/2313-8890.2022.11.02>.
4. Безпрозванных А. В. Физическая интерпретация кривых восстановления напряжения на основе схем замещения неоднородного диэлектрика. *Технічна електродинаміка*. 2009. № 6. С. 23–27.
5. Діелектричні параметри фазної та поясної паперової просоченої ізоляції силових кабелів / Г. В. Безпрозванных та ін. *Електротехніка і електромеханіка*. 2025. № 2. С. 69–78. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272x.2025.2.09>.
6. Bezprozvannykh G. V., Moskvitin Ye. S. Physical processes of aging and assessment of the technical condition of power cables with paper-impregnated insulation. *2023 IEEE 4th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, Kharkiv, Ukraine, 2–6 October 2023. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1109/khpiweek61412.2023.10312975>.
7. Москвитин Е. С. Контроль процессов старения силовых кабелей с бумажно-пропитанной изоляцией по измерениям диэлектрических характеристик изоляционных промежутков. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. 2011. № 3. С. 95–106.
8. Kostikov I. Dielectric dissipation factor in three-core power cables. *Measuring Equipment and Metrology*. 2021. Vol. 82, no. 2. P. 50–56. DOI: <https://doi.org/10.23939/istcm2021.02.050>.
9. Безпрозванных А. В., Москвитин Е. С., Кессаев А. Г. Абсорбционные характеристики фазной и поясной бумажно-пропитанной изоляции силовых кабелей на постоянном напряжении. *Електротехніка і електромеханіка*. 2015. № 5. С. 63–68. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272x.2015.5.09>.

10. Костюков І. О. Особливості оцінювання часткових ємностей ізоляції трьохжильних силових кабелів із застосуванням сукупних вимірювань. *Український метрологічний журнал*. 2021. № 1. С. 15–20. DOI: <https://doi.org/10.24027/2306-7039.1.2021.228201>.
11. Беспрозванных А. В., Рудаков С. В., Москвитин Е. С. Предострашение чрезвычайных ситуаций путем контроля состояния изоляции многожильных кабелей по параметрам частичных емкостей и тангенсу угла диэлектрических потерь : монография. Харьков : НУЦЗУ, КП «Міська друк.», 2013. 132 с.
12. Беспрозванных А. В., Набока Б. Г. Математические модели и методы расчета электроизоляционных конструкций. Харьков : НТУ «ХПИ», 2013. 108 с.
6. G. V. Bezprozvannykh and Y. S. Moskvitin, "Physical processes of aging and assessment of the technical condition of power cables with paper-impregnated insulation", in *2023 IEEE 4th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, Kharkiv, Ukraine, Oct. 2–6, 2023. IEEE, 2023, doi: <https://doi.org/10.1109/khpiweek61412.2023.10312975>
7. E. S. Moskvitin, "Kontrol protsessov starenia silovykh kabelei s bumazhno-propitannoi izoliatsiei po izmereniam dielektricheskikh kharakteristik izoliatsionnykh promezhutkov [Control of ageing processes in power cables with paper-impregnated insulation based on measurements of the dielectric characteristics of insulation gaps]", *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Energy: Reliability and Energy Efficiency*, no. 3, pp. 95–106, 2011. (in Russian)
8. I. Kostiukov, "Dielectric dissipation factor in three-core power cables", *Measuring Equipment and Metrology*, vol. 82, no. 2, pp. 50–56, 2021, doi: <https://doi.org/10.23939/istcm2021.02.050>
9. G. V. Bezprozvannykh, E. S. Moskvitin, and A. G. Kyessayev, "The absorption characteristics of the phase and zone paper-impregnated insulation of power cable at direct voltage", *Electrical Engineering & Electromechanics*, no. 5, pp. 63–68, Nov. 2015, doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272x.2015.5.09> (in Russian)
10. I. Kostiukov, "Particular properties of estimation of partial capacitances of insulation of three core power cables by applying aggregate measurements", *Ukrainian Metrological Journal*, no. 1, pp. 15–20, Mar. 2021, doi: <https://doi.org/10.24027/2306-7039.1.2021.228201> (in Ukrainian)
11. A. V. Bezprozvannykh, S. V. Rudakov, and E. S. Moskvitin, *Predostrazhchenie Cherezvychainykh Situatsii Putem Kontrolya Sostoianii Izoliatsii Mnogozhilnykh Kabelei Po Parametram Chastichnykh Emkosti I Tangensu Ugla Dielektricheskikh Poter [Prevention of Emergencies by Monitoring the Insulation Condition of Multi-Core Cables Based on Partial Capacitance and Dielectric Loss Tangent Parameters]*. Kharkiv: NUTsZU, KP «Miska druk.», 2013. (in Russian)
12. A. V. Bezprozvannykh and B. H. Naboka, *Matematicheskie Modeli I Metody Rascheta Elektroizoliatsionnykh Konstruktsii [Mathematical Models and Methods for Calculating Electrical Insulation Structures]*. Kharkiv: NTU «KhPI», 2013. (in Russian)

Надійшла (received) 23.06.2025

UDC 621.315.2

KOSTIUKOV IVAN ✉ – Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Theoretical Electrical Engineering, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8923-0579>; e-mail: iakostiukow@gmail.com.

FOSHCHII MARIIA – Senior Lecturer of Management Department, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1555-3110>; e-mail: Mariia.Foshchii@khp.edu.ua.

SYZOV YEVGENIY – Postgraduate Student of the Department of Theoretical Electrical Engineering, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"; Kharkiv, Ukraine; e-mail: sizovevgeniy94@gmail.com.

METHODS OF FORMATION OF SYSTEM OF EQUATIONS FOR DETERMINATION OF DIELECTRIC ABSORPTION PARAMETERS OF INSULATION IN THREE-CORE POWER CABLES BY APPLYING AGGREGATE MEASUREMENTS

The article is devoted to a review of the methods of forming systems of equations when determining partial capacitances and individual values of the dielectric loss tangent of the insulation layers of three-core power cables with paper-impregnated insulation in a common metal sheath. The methods of connecting metal elements of the power cable structure when measuring the total values of capacitance and dielectric loss tangent used in the formation of systems of equations are presented. An analytical review of the most common control methods used in assessing the degree of aging of paper insulation of three-core power cables is presented. A comparative analysis of the main features of the methods of determining individual values of electrical capacitance and dielectric loss tangent using direct and total measurements is carried out. It is shown that, taking into account the need to carry out control in a wide frequency range, the effectiveness of the use of existing methods of eliminating the influence of parasitic capacitances on the measurement results is reduced. When using auto-compensating impedance-to-voltage converters, such a decrease is associated with a decrease in the gain of the operational amplifier, and in the case of using immittance meters with three terminals, with the occurrence of resonant phenomena in the control object due to an increase in its parasitic inductance due to the use of an additional terminal of the immittance meter. A method for evaluating individual values of the dielectric loss angle tangent using cumulative measurements is proposed, which consists in measuring the conductivity of insulating gaps, which, after preliminary determination of the partial capacitances of the insulation, allows determining its dielectric loss angle tangent by applying the corresponding expression for a non-ideal capacitor with dielectric losses.

Keywords: diagnostics of insulation; dielectric power losses; nuclear power plants; impedance measurement; least squares method.

НОЗДРЕНКОВ ВАЛЕРІЙ СТАНІСЛАВОВИЧ ✉ – кандидат технічних наук, доцент, докторант кафедри комп'ютерних наук та системного аналізу, Черкаський державний технологічний університет; м. Черкаси, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-0579-6821>; e-mail: v.s.nozdrenkov.d24@chdtu.edu.ua.

ДЯГОВЧЕНКО ІЛЛЯ МИКОЛАЙОВИЧ – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електроенергетики, Сумський державний університет; м. Суми, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8575-8280>; e-mail: i.diahovchenko@etech.sumdu.edu.ua.

ПЕТРОВСЬКИЙ МИХАЙЛО ВАСИЛЬОВИЧ – кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри електроенергетики, Сумський державний університет; м. Суми, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0387-3136>; e-mail: m.petrovskiy@etech.sumdu.edu.ua.

МЕТОД ОПТИМАЛЬНОГО ЗАРЯДЖАННЯ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ З УРАХУВАННЯМ ВПЛИВУ НА РОЗПОДІЛЬЧІ МЕРЕЖІ, ТРАНСФОРМАТОРИ ТА ЯКІСТЬ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

Зростання популярності електромобілів та їх широке впровадження у повсякденне життя створює низку технічних та експлуатаційних викликів для електричних розподільчих мереж, особливо для їх критичних компонентів, таких як розподільчі трансформатори. Високі пікові навантаження, спричинені неконтрольованим процесом заряджання електромобілів, можуть призводити до перевантаження та зниження терміну служби обладнання, що в результаті збільшує витрати на утримання та модернізацію інфраструктури. В даній статті розглянуто та запропоновано практично орієнтований метод оптимального заряджання електромобілів, який базується на комплексному підході із використанням нечіткої логіки. Цей підхід дозволяє детально оцінити вплив зарядних процесів на розподільчі мережі, включаючи аналіз гармонічних спотворень напруги, температурних умов експлуатації та змінного рівня навантаження на трансформатори. У дослідженні розглядаються різні сценарії заряджання: заряджання на вимогу, заряджання у непіковий період та комбінований режим із застосуванням технології двонаправленого обміну енергією між електромобілем та домоюкою. За результатами аналізу показано, що оптимізація графіків заряджання суттєво знижує ризик перевантаження мереж та трансформаторів, зменшує швидкість їх старіння, забезпечує більш високу якість електроенергії та дозволяє уникнути або значно скоротити фінансові витрати на модернізацію електроенергетичної інфраструктури. Запропонований метод враховує локальні умови експлуатації, що дозволяє ефективно впроваджувати його в реальні системи розподілу електроенергії, адаптуючи до індивідуальних потреб користувачів та особливостей мереж.

Ключові слова: електромобіль, оптимальне заряджання, розподільчі мережі, трансформатор, нечітка логіка, пікове навантаження, якість електроенергії, двонаправлений обмін електроенергії.

Вступ. У зв'язку зі стрімким загостренням глобальних екологічних викликів, зокрема змінами клімату, виснаженням природних ресурсів та погіршенням якості навколишнього середовища, електромобільний транспорт став одним із ключових напрямів сталого розвитку. Урядові організації та міжнародні інституції активно підтримують поширення електромобілів (ЕМ) як ефективного засобу зменшення викидів парникових газів та зниження залежності від традиційних викопних енергоносіїв [1].

За інформацією агентства Reuters, у 2024 році світові продажі повністю електричних та гібридних автомобілів з можливістю підзарядки зросли на 25 % і сягнули рекордних 17 мільйонів одиниць [2]. Лідером цього сегменту залишається Китай, де річний обсяг продажів становив близько 11 млн автомобілів, зокрема, лише в грудні продажі збільшились на 36,5 %, досягнувши 1,3 мільйона одиниць. В Європі спостерігалася стабілізація ринку після зменшення субсидування у Німеччині, а у США та Канаді попит продовжував зростати, незважаючи на складну економічну ситуацію та проблеми з ланцюгами постачання матеріалів для акумуляторів [2, 3].

Водночас широкомасштабне впровадження електромобілів супроводжується низкою нових технічних викликів для систем розподілу електроенергії. Особливу увагу привертає суттєве збільшення навантажень, через активне застосування зарядних

пристроїв із потужністю від 3 до 22 кВт, що значно перевищує типові показники побутового електроспоживання [1, 4]. Відсутність належного керування процесами заряджання може призводити до перевантажень мереж, аварійних ситуацій на трансформаторних підстанціях, погіршення якості електроенергії та суттєвого зменшення терміну служби обладнання [1, 4]. Це, у свою чергу, збільшує фінансові витрати на утримання та модернізацію мережевої інфраструктури, створюючи додаткові перешкоди для масового поширення електромобільного транспорту [4].

Таким чином, існує нагальна необхідність у розробці та впровадженні ефективних рішень щодо оптимізації заряджання електромобілів у розподільчих мережах. Метою даної статті є аналіз та обґрунтування методу оптимального керування процесами заряджання електромобілів, що дозволяє мінімізувати негативний вплив на електричні мережі й трансформаторні підстанції, знизити пікові навантаження, оптимізувати графіки споживання електроенергії та врахувати технічні обмеження інфраструктури й потреби кінцевих споживачів.

Представлене дослідження базується на попередньо розробленій авторами моделі оцінювання старіння розподільчих трансформаторів за допомогою нечіткої логіки [4]. На основі цих теоретичних засад було сформовано практичні рекомендації, алгоритми та методичні підходи для оптимального керування процесами заряджання електромобілів. Запропоновані

© В. С. Ноздренков, І. М. Дяговченко, М. В. Петровський, 2025



Ця робота ліцензується відповідно до **Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)**
Конфлікт інтересів: Автори заявили про відсутність конфлікту

рішення дозволяють не лише знизити навантаження на мережу, але й підвищити ефективність та надійність її роботи, підтримуючи таким чином сталий розвиток електромобільного транспорту.

Огляд літератури. Останні наукові дослідження підтверджують зростання уваги до різноманітних аспектів взаємодії ЕМ із системами розподілу електроенергії. Особливий акцент ставиться на аналізі впливу різних схем та режимів заряджання на працездатність та надійність окремих компонентів електричних мереж, зокрема трансформаторів та ліній електропередач. Наприклад, у роботі [5] досліджено основні наслідки інтеграції великої кількості електромобілів у розподільчі мережі, зокрема розглядаються питання якості електроенергії та втрат у мережі. Автори у [6] провели системне оцінювання ефективності застосування електромобілів для скорочення викидів CO₂, враховуючи особливості регіональної структури генерації електроенергії.

Важливим фактором, що ускладнює інтеграцію електромобілів до електричних мереж, є спотворення форми струму та напруги через вплив вищих гармонік, що було проаналізовано за допомогою ймовірнісного моделювання в роботі [7]. Вплив швидкісних зарядних станцій на якість електроенергії та їх роль у деградації мережевих елементів докладно вивчали автори статей [8, 9], де було також запропоновано ефективні стратегії мінімізації негативних наслідків для трансформаторів та мереж. У свою чергу, автори дослідження [10] застосували стохастичні моделі для оцінки теплового старіння трансформаторів під впливом навантажень, що виникають у результаті заряджання електромобілів, і наголосили на важливості координованого планування цього процесу. Аналогічні результати отримані в роботі [11], де акцентується увага на кількісному аналізі скорочення терміну служби трансформаторів за різних умов навантаження та різних режимів заряджання електромобілів.

Для зменшення негативних впливів масового заряджання електромобілів на електромережі автори пропонують різноманітні технічні та управлінські рішення. Зокрема, для ефективного управління термінами служби та станом трансформаторів було розроблено низку моделей, що враховують генерацію з відновлюваних джерел, накопичувачі енергії, конденсаторні установки та системи активної компенсації реактивної потужності [4, 12]. Автори роботи [12] зазначають, що модернізація енергомережі, хоча і є ефективним інструментом, має високу вартість, тому її доцільність є обмеженою.

У новіших дослідженнях пропонується використовувати інтелектуальні алгоритми для балансування навантажень і управління процесами заряджання та розряджання акумуляторів електромобілів. Автори роботи [13] запропонували модель на основі машинного навчання для прогнозування пікових навантажень і оптимального планування процесів заряджання з урахуванням економічних і технічних критеріїв. Дослідження [14] розглядає вплив швидких зарядних станцій на експлуатаційний ресурс трансформаторів,

використовуючи стохастичні моделі для прогнозування втрат життєвого циклу обладнання.

Ще одним цікавим напрямком є використання методів штучного інтелекту для оптимізації графіків заряджання: так, у роботах [15, 16] розглянуто методи керування зарядкою електромобілів для зменшення навантаження та підвищення стабільності мережі, а в [17] – використання нейронних мереж із довгою короткочасною пам'яттю для високоточного прогнозування навантаження та цін на електроенергію.

Також дедалі більшої популярності набуває концепція двонаправленого обміну енергією – Vehicle-to-Grid (V2G) та Vehicle-to-Home (V2H), – завдяки якій електромобілі можуть бути інтегровані в енергосистему не лише як споживачі, а і як гнучкі накопичувачі енергії, здатні підтримувати баланс потужності та стабільність напруги в розподільчих мережах [18].

Окремі методи оптимізації режимів заряджання ЕМ для вирівнювання графіка навантаження та підтримання напруги в заданих межах представлені в роботах [19, 20]. При цьому автори акцентують увагу на економічній ефективності та зменшенні потреби в дорогих модернізаціях інфраструктури. У дослідженні [21] наведено аналіз економічної ефективності різних схем заряджання та розряджання електромобілів на паркувальних зонах, розглядаючи не тільки витрати, а й вплив цих процесів на якість електроенергії та втрати в електромережах.

Незважаючи на значну кількість досліджень, у багатьох запропонованих підходах все ще не враховуються специфічні умови локальних розподільчих мереж, кліматичні та експлуатаційні особливості регіонів, а також відсутні чіткі практичні рекомендації щодо застосування запропонованих алгоритмів у конкретних умовах роботи розподільчих трансформаторів. Саме тому в даній роботі ставиться завдання запропонувати практичні рішення з урахуванням реальних умов експлуатації українських розподільчих мереж та особливостей локальних навантажень з боку електромобілів.

Мета статті. Враховуючи зростаюче поширення ЕМ та існуючі обмеження сучасних методів керування їх заряджанням, метою цього дослідження є розробка практично орієнтованого методу оптимального заряджання електромобілів для розподільчих мереж. Запропонований метод інтегрує аналіз впливу зарядних пристроїв ЕМ на параметри розподільчих мереж, термін служби трансформаторів та якість електроенергії з метою мінімізації негативних наслідків, пов'язаних з піковими навантаженнями, перевантаженнями та гармонічними спотвореннями.

На відміну від попередньої роботи авторів [4], яка була зосереджена на теоретичних аспектах та оцінюванні впливу заряджання ЕМ на трансформаторні підстанції, у цьому дослідженні головна увага приділяється розробці практичних рекомендацій, алгоритмів адаптивного керування та методичних підходів для реального впровадження у низьковольтні розподільчі мережі. Особливістю розробленого методу є врахування індивідуальних

вимог користувачів електромобілів, прогнозування графіків електричного навантаження та застосування стратегій інтелектуального керування енергоспоживанням.

1. Методичний підхід та опис запропонованої моделі. Адаптація діагностичних моделей для аналізу електроенергетичних систем передбачає проведення серії початкових вимірювань, спрямованих на уточнення параметрів моделі відповідно до конкретних умов експлуатації. Враховуючи значну невизначеність та неповноту початкових даних, особливо щодо режимів навантаження та перегріву обладнання, було обрано підхід на основі нечіткої логіки. Використання цього підходу дозволяє враховувати невизначеність експлуатаційних параметрів, які суттєво впливають на оцінку стану трансформаторів та мереж загалом. У даній роботі застосування нечіткої логіки є оптимальним інструментом для аналізу впливу

процесів заряджання та розряджання електромобілів на пікові навантаження у мережах, що розглядається на прикладі трьох практичних сценаріїв.

1.1 Розробка алгоритму та опис моделі. На блок-схемі, представлений на рис. 1, наведено алгоритм розробленого методу на основі нечіткої логіки для оцінювання рівня навантаження трансформатора. На основі оцінювання поточного стану трансформаторів, користувачу (наприклад, оператору розподільчої системи) надається відповідне попереджувальне повідомлення, після чого можуть бути прийняті превентивні заходи для уникнення можливих аварій. Ці заходи можуть бути виконані як автоматично, так і вручну, та можуть включати обмеження навантаження, регулювання генерації фотоелектричних систем (PV), реконфігурацію розподільчої мережі або зміну ринкових цін на електроенергію.

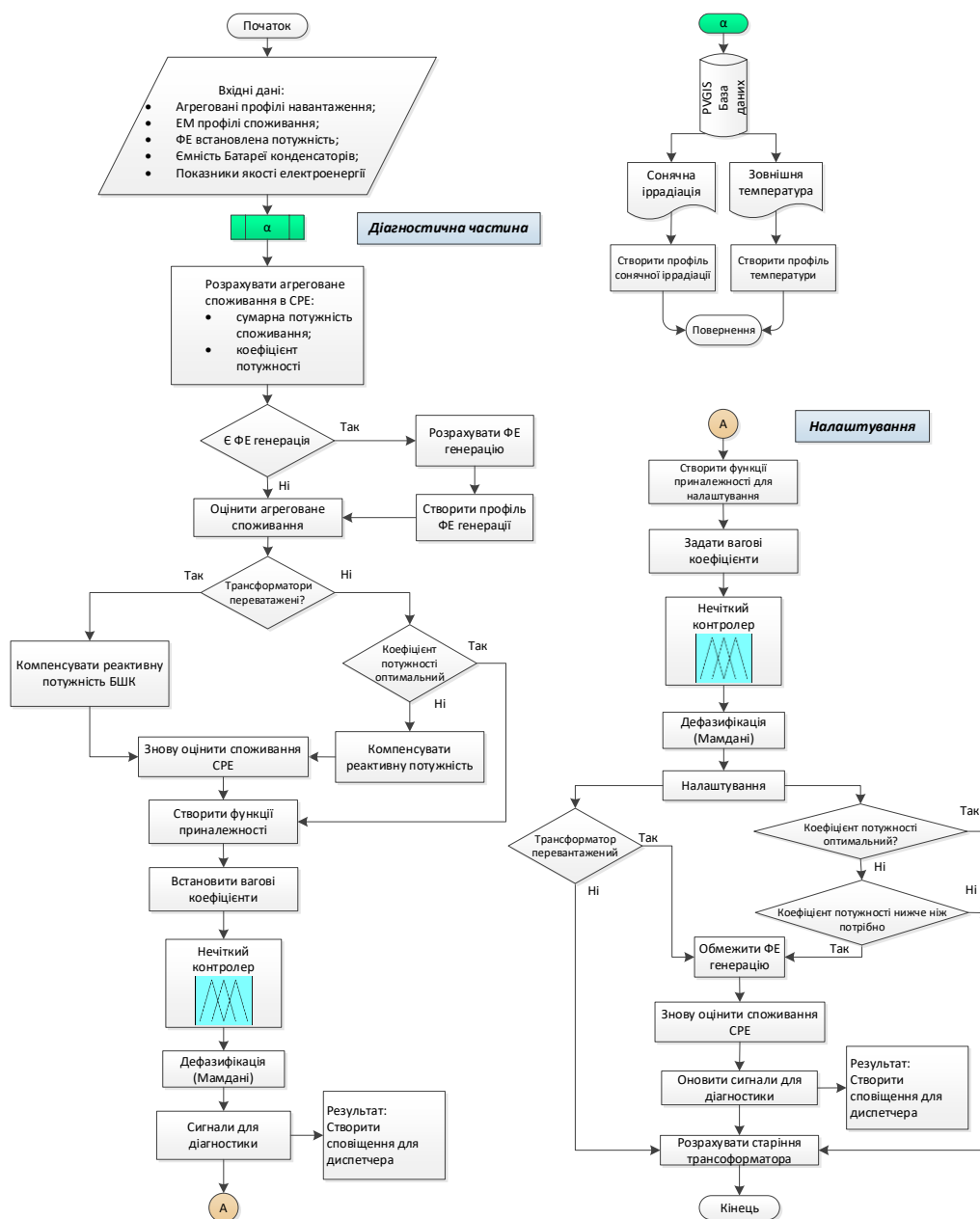


Рисунок 1 – Структурна схема запропонованого в дослідженні підходу на основі нечіткої логіки

Алгоритм починається з активації системи нечіткого керування, яка застосовується для діагностики стану трансформатора розподільчої мережі. Ця система включає набір вхідних функцій приналежності, контролер на основі правил та процес дефазифікації, як показано на рис. 2. Функції приналежності є математичними засобами, що визначають ступінь відповідності вхідних величин певним нечітким множинам, переводячи вхідні параметри у діапазон від 0 до 1. Використовуючи доступні вихідні дані, алгоритм розраховує сумарне споживання електроенергії та коефіцієнт потужності (PF) на вторинній шині трансформатора з номінальною напругою 0,4/0,23 кВ, після чого, у випадку перевантаження або недостатнього коефіцієнта потужності, активується батарея конденсаторів (SCB) для компенсації споживання реактивної потужності.

Потужність фотоелектричної генерації може регулюватися в межах від 0,85 до 1,0 відносних одиниць від доступної потужності PV за допомогою нечіткої логіки керування. Для цього додатковий модуль нечіткого керування інтегрований у модель

MATLAB-Simulink (рис. 3). Блок «PV_cont» поєднує діагностичну і керуючу частини моделі. У випадку перевантаження трансформатора або виникнення зворотних потоків енергії, вихідну потужність PV може бути зменшено відповідно до логіки, закладеної у функції MATLAB-S. Невеликі обмеження потужності PV також можливі у випадках, коли управління розподільчою мережею фокусується на підтриманні необхідного значення коефіцієнта потужності. Для цих потреб було включено додаткову логіку перевірки типу «Else-If».

Розроблений алгоритм налаштування цієї моделі має незначний вплив на термін служби трансформатора, оскільки у досліджуваному випадку зворотні потоки потужності ніколи не перевищують номінальну потужність трансформатора. Однак він дозволяє зменшити амплітуду щоденних коливань коефіцієнта потужності, обмежуючи їхній діапазон змін. Варто зазначити, що налаштування алгоритму є опціональним та може бути увімкнено або вимкнено користувачем відповідно до власних потреб.

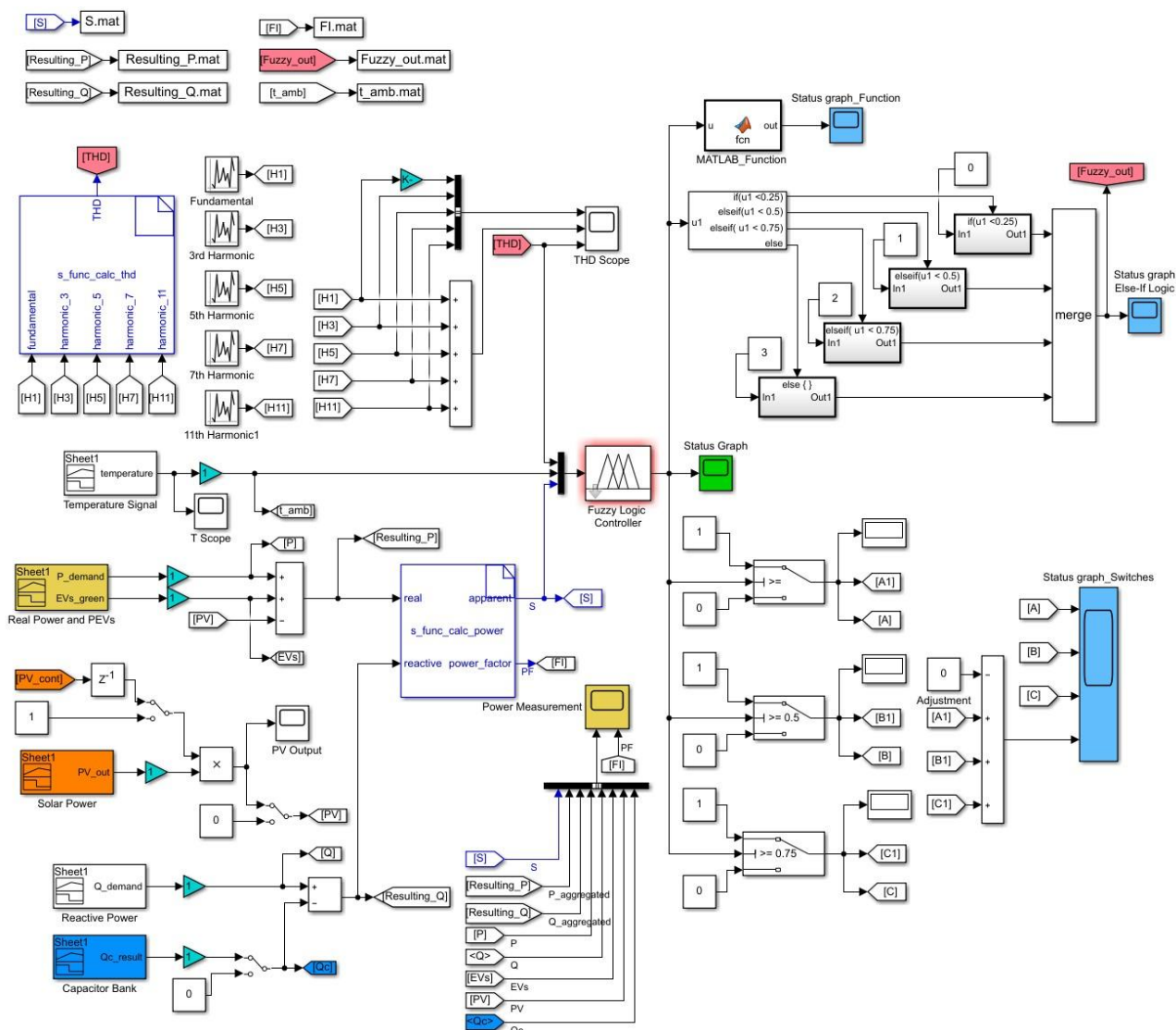


Рисунок 2 – MATLAB-Simulink модель модуля діагностики

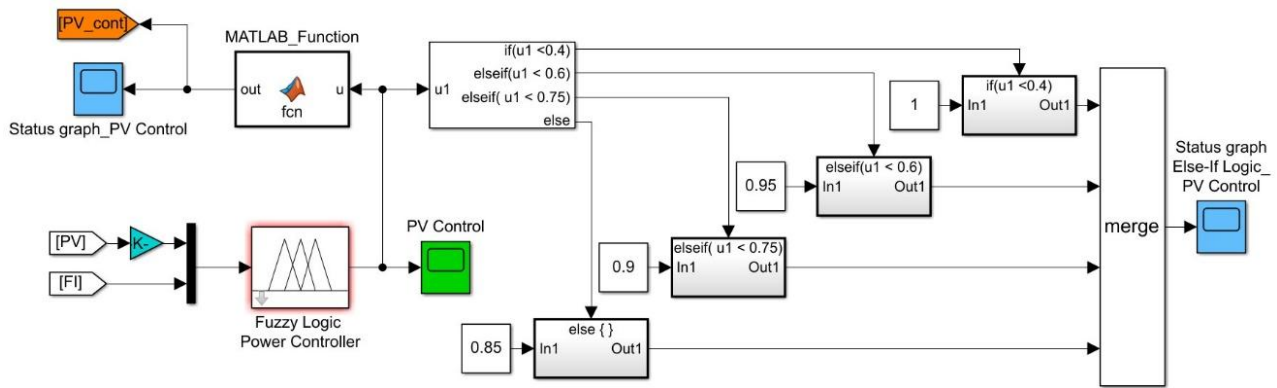


Рисунок 3 – MATLAB-Simulink модель модуля налаштування

1.2 Налаштування керування на основі нечіткої логіки. Запропонована модель на основі нечіткої логіки аналізує параметри, які впливають на нормальну роботу трансформатора, дозволяючи завчасно прогнозувати та уникати аварійних ситуацій. Вхідні параметри системи керування визначаються за допомогою функцій приналежності (MF). У програмному середовищі MATLAB Fuzzy Logic Toolbox представлені різні типи функцій приналежності, зокрема трикутні, трапецієподібні, сигмоїдальні, поліноміальні та гаусівські.

Діагностична частина моделі використовує три вхідні змінні: коефіцієнт нелінійних спотворень (THD), температура навколишнього середовища та агреговане навантаження на вторинній шині розподільного трансформатора (рис. 4). Кожна із зазначених вхідних змінних містить від трьох до чотирьох функцій приналежності.

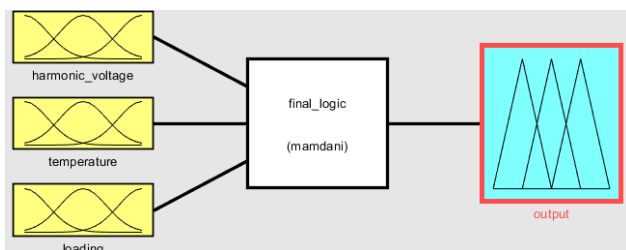


Рисунок 4 – Нечітка система діагностики

Характеристики цих функцій можуть бути змінені шляхом регулювання вагових коефіцієнтів, що дозволяє встановити пріоритетність одних параметрів над іншими. Наприклад, коефіцієнт ваги змінної «harmonic_voltage» (гармонічна напруга) дорівнює 1, коефіцієнт змінної «temperature» (температура) – 2, а змінної «loading» (навантаження) – 3. Це означає, що навантаження впливає на стан трансформатора у 1,5 рази сильніше, ніж температура, і у 3 рази сильніше, ніж гармонічні спотворення напруги.

Вагові коефіцієнти визначаються користувачем та можуть бути змінені залежно від конкретних умов експлуатації. У запропонованій моделі використовується нечітка система Мамдані з методом центроїда для дефазифікації. Три функції приналежності, що пов'язані з якістю електроенергії, мають гаусівську форму, яка забезпечує їхню

безперервність та ненульові значення у всьому діапазоні. Вони охоплюють діапазон від 0 % до 12 % і класифікують гармонічні спотворення напруги як низькі, середні або високі, що показано на рис. 5 а. Параметр THD використовується для оцінки скорочення терміну служби трансформатора, оскільки підвищений рівень THD спричиняє посилене нагрівання обмоток, тоді як низькі значення мають мінімальний вплив.

Для параметра температури навколишнього середовища були створені чотири функції приналежності, що охоплюють діапазон від -25°C до $+50^{\circ}\text{C}$ (рис. 5 б). Функції «нижче норми» та «дуже гаряче» мають двосторонню складену гаусівську форму, тоді як «нормальна» та «гаряча» представлені трикутними функціями.

Вхідне значення навантаження нормалізується у межах від 15 % до 180 % номінального значення трансформатора і має три функції приналежності (рис. 5 в). Нормальні значення навантаження представлені простою гаусівською MF, тоді як двосторонні складені гаусівські функції використовуються для випадків, коли навантаження виходить за межі номінального діапазону.

Для визначення вихідних реакцій системи також необхідні функції приналежності. У розробленому інструменті чотири трикутні MF використовуються для класифікації стану системи: «Без проблем» із піком на рівні 0,12, «Попередження» з піком на 0,38, «Можлива проблема» з піком на 0,64, і «Неминуча проблема» з піком на 0,88 (рис. 5 г).

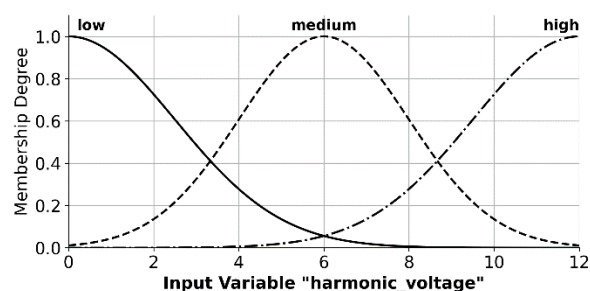
Для контролера нечіткої логіки у діагностичній частині було визначено двадцять п'ять правил приналежності, перелічених у табл. 1. Варто зазначити, що правила приналежності в цьому дослідженні можуть бути визначені користувачем і змінюватися залежно від конкретного застосування.

Крім того, усі вихідні функції приналежності інтегровані в єдину нечітку множину, після чого застосовується процес дефазифікації Мамдані для отримання чіткого значення, що відображає агреговані невизначені дані.

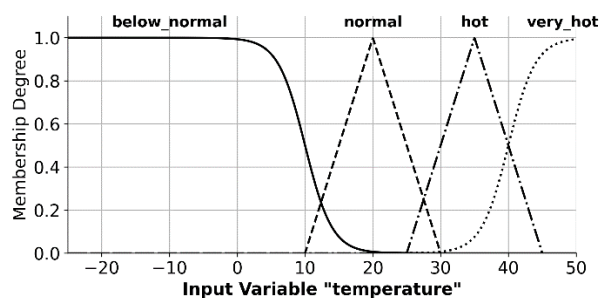
Після дефазифікації вихідні дані кодуються у вигляді цілих чисел від 0 до 3, які представляють стан трансформатора та можуть бути перетворені в конкретне повідомлення із відповідним рівнем

попередження для оператора розподільчих мереж. Отримані повідомлення зберігаються у змінних робочого простору та інтерпретуються наступним

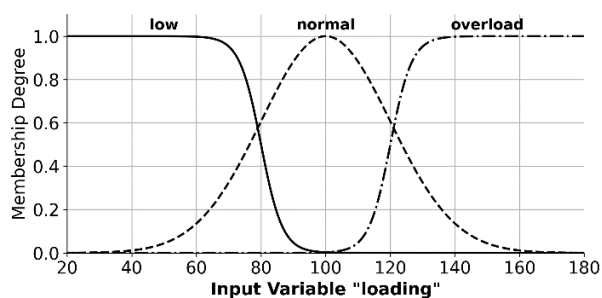
чином: 0 – «Без проблем», 1 – «Попередження», 2 – «Можлива проблема», 3 – «Неминуча проблема» (рис. 5 з).



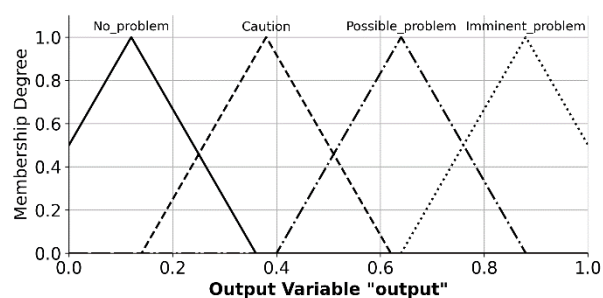
а



б



в



г

Рисунок 5 – Графіки функції належності:

а – THD напруги; б – температура навколишнього середовища; в – навантаження; г – вихід діагностичного контролера нечіткої логіки

Таблиця 1 – Правила для нечіткого контролера діагностики

Правило №	If the «ambient temperature» is:	And the «harmonic voltage» is:	And the «loading» is:	Then the Output is:
1	below normal	low	low	No problem
2	below normal	low	normal	No problem
3	below normal	medium	low	No problem
4	below normal	medium	normal	Caution
5	below normal	high	low	No problem
6	below normal	high	normal	Caution
7	normal	low	low	No problem
8	normal	low	normal	Caution
9	normal	medium	low	No problem
10	normal	medium	normal	Possible problem
11	normal	high	low	Caution
12	normal	high	normal	Possible problem
13	hot	low	low	Caution
14	hot	low	normal	Possible problem
15	hot	medium	low	Caution
16	hot	medium	normal	Possible problem
17	hot	high	low	Possible problem
18	hot	high	normal	Imminent problem
19	very hot	low	low	Possible problem
20	very hot	low	normal	Imminent problem
21	very hot	medium	low	Possible problem
22	very hot	medium	normal	Imminent problem
23	very hot	high	low	Possible problem
24	very hot	high	normal	Imminent problem
25	—	—	overload	Imminent problem

Таким чином, діагностичний модуль моделі Simulink забезпечує моніторинг стану розподільчого трансформатора та генерує повідомлення про ступінь загрози, що допомагає передбачити потенційний вихід з ладу трансформатора та запобігти аварійним відключенням.

На наступних етапах алгоритму розраховується індекс втрати ресурсу трансформатора (LoL) для отримання кількісної оцінки старіння трансформатора.

Для покращення PF в алгоритм інтегровано модуль налаштування нечіткої логіки (рис. 6), що дозволяє регулювати вихідну потужність PV у діапазоні від 0,85 до 1,0 відносних одиниць. У разі виникнення зворотних потоків енергії межі керування можуть бути розширені, але в даному дослідженні цей випадок не розглядається. Цей підхід може бути активований або деактивовані користувачем.

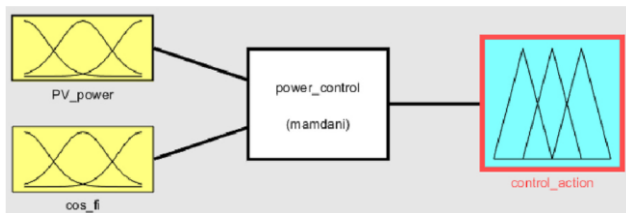


Рисунок 6 – Нечітка система налаштування

Контролер нечіткої логіки у модулі налаштування має два входні параметри: інформацію про доступну потужність PV-генерації та значення PF на вторинній стороні трансформатора. Обидва входні параметри мають власні функції приналежності.

Змінна «PV_power» моделюється за допомогою трапецієподібних функцій належності (рис. 7 а), які охоплюють діапазон від 0 до 1.4 від встановленої потужності фотоелектричної системи. Розширена

верхня межа дозволяє враховувати можливість підключення додаткових PV-джерел до енергомережі. При цьому значення потужності до 0.55 розглядаються як низькі, значення понад 0.95 як високі, а всі інші як середні.

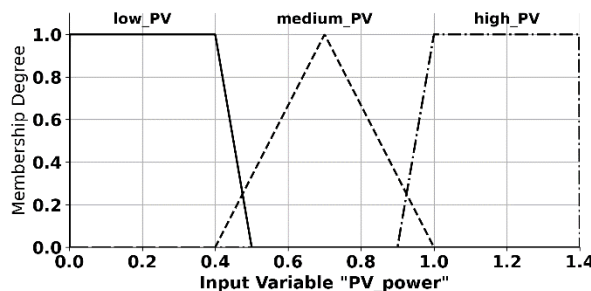
Функції належності для змінної «cos_fi» також є трапецієподібними і описують плавний перехід між низьким та високим значенням коефіцієнта потужності (рис. 7 б).

На відміну від входних змінних, вихідна змінна «control_action» описується трикутними функціями належності, що відображають потенційну реакцію системи (рис. 7 в). Значення в діапазоні від 0 до 0.5 відповідають делікатному (subtle) керуванню, від 0.25 до 0.75 – активному (active), а від 0.75 до 1 – інтенсивному (intense) регулюванню.

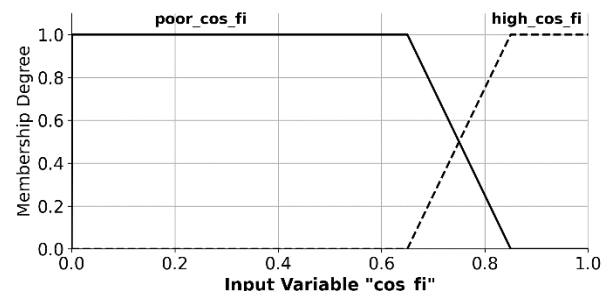
Контролер нечіткої логіки у модулі налаштування використовує три правила приналежності, перелічені у табл. 2. Процес налаштування вважається успішним, якщо спостерігається помітне покращення PF, і при цьому трансформатор не перевантажується через існуючі зворотні потоки енергії. У рамках цього дослідження регулюючі дії були спроектовані так, щоб мати мінімальний вплив (непотрібне обмеження потужності PV не є бажаним). Отже, модуль налаштування має незначний вплив на роботу трансформатора.

Таблиця 2 – Нечіткі правила налаштування

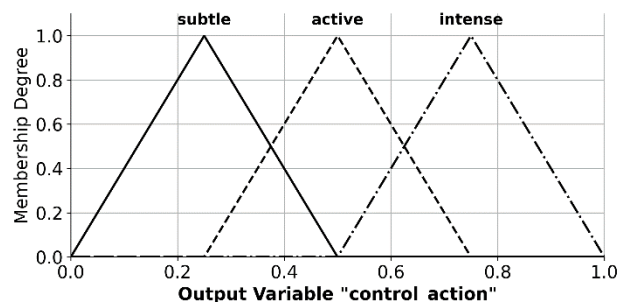
Правило №	If the «PV power» is:	Or the «cos_fi» is:	Then the «control action» is:
1	low	high	subtle
2	medium	–	active
3	high	poor	intense



а



б



в

Рисунок 7 – Графіки функції належності:

а – PV генерації; б – коефіцієнта потужності; в – виходу управління

1.3 Гіпотетичні сценарії. У цьому дослідженні розглядаються три сценарії, опис яких наведено в табл. 3. Для охоплення широкого спектра можливих наслідків заряджання ЕМ у теперішньому та майбутньому були змодельовані шість рівнів проникнення ЕМ у мережу: 15 %, 33 %, 50 %, 67 %, 85 % і 100 %.

Зважаючи на те, що приймальна здатність низьковольтної розподільчої системи може бути обмежена, у першу чергу через розподільчий трансформатор, у цьому дослідженні не враховується перевантаження повітряних ліній електропередачі та підземних кабелів. Гілки мережі можуть зазнавати перевантажень у випадках дуже довгих ліній живлення та рівня проникнення ЕМ понад 90 %.

Таблиця 3 – Досліджувані сценарії

Сценарій	Опис
Сценарій 1	Лінія живлення включає житлові та виробничі навантаження, фотоелектричні установки та статичні батареї конденсаторів. Розглядається режим заряджання на вимогу, коли процес заряджання починається відразу після прибуття автомобіля додому та його паркування.
Сценарій 2	Подібно до попереднього сценарію, але розглядається режим заряджання у непіковий час, коли початок процесу заряджання відкладається до завершення вечірнього пікового періоду споживання.
Сценарій 3	Подібно до попереднього сценарію, але додатково передбачено двонаправлену передачу енергії V2H. Заряджання відбувається після опівночі, а у проміжку з 17:00 до 24:00 електромобілі можуть віддавати енергію до будинків, якщо є достатня ємність батареї та дозволяє використання автомобіля поза домом.

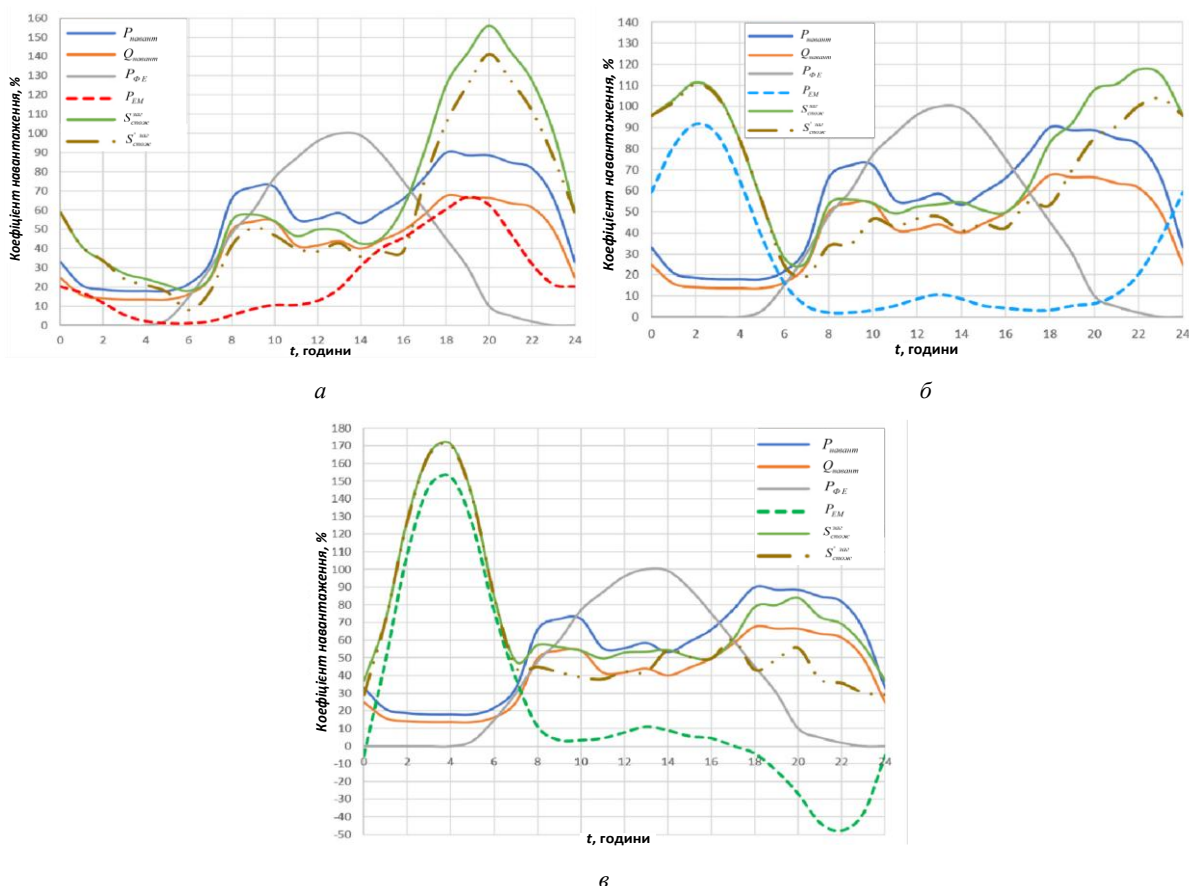


Рисунок 8 – Графіки навантаження на шинах низької напруги при 85 % проникненні ЕМ :

а – для режиму заряджання на вимогу; б – для режиму заряджання у непіковий час;

в – для комбінованого режиму непіковий час + V2H

З рис. 8 в видно, що поєднання заряджання в непіковий час із технологією двонаправленого обміну енергії V2H створює найвище навантаження на трансформатор при 85 % проникнення електромобілів. Це свідчить про доцільність застосування альтернативних режимів заряджання за умов високої насиченості системи ЕМ.

Слід зазначити, що графіки на рис. 8 а–в є демонстраційними прикладами для одного конкретного дня і не враховують сезонні або добові коливання попиту на електроенергію чи вихідної потужності фотоелектричних систем, які можуть істотно змінювати загальний профіль навантаження.

Для глибшого аналізу впливу навантаження від заряджання електромобілів на локальні низьковольтні мережі було здійснено річне моделювання за декількома умовними сценаріями. У табл. 4 узагальнено тривалість перебування трансформатора в різних режимах та рівень LoL на основі результатів нечіткого моделювання та обчислених показників.

Результати демонструють, що за умов проникнення ЕМ до 50 % додаткове навантаження від заряджання не чинить суттєвого впливу на процес старіння трансформатора, незалежно від вибраної стратегії заряджання. Максимальне значення індексу LoL у цьому випадку становить лише 0,2324 % для комбінованого режиму – непіковий режим + V2H (сценарій 3), що свідчить про незначний рівень деградації обладнання.

Однак при підвищенні частки електромобілів не всі стратегії заряджання залишаються однаково ефективними. Наприклад, при проникненні ЕМ 67 % використання непікового режиму в поєднанні з функцією V2H (сценарій 3) призводить до надмірного зношення трансформатора – індекс LoL сягає 14,6193 %. У цьому режимі трансформатор працює у критичному стані («Неминуча проблема») протягом

455,96 годин на рік, що свідчить про небезпечне перевантаження.

Для порівняння, у режимі заряджання на вимогу (сценарій 1) час перебування у критичному режимі становить лише 2,36 год, а індекс LoL – 0,3394 %. У варіанті із звичайним непіковим заряджанням (сценарій 2) критичні стани взагалі не фіксуються, а статус «Можлива проблема» триває 398,28 год, при цьому загальний індекс зношення є незначним – лише 0,0455 %.

За рівня проникнення ЕМ 85 %, заряджання на вимогу (сценарій 1) забезпечує LoL на рівні 1,9743 %. Перехід до непікового режиму (сценарій 2) дозволяє зменшити цей показник майже вчетверо – до 0,5239 %, при цьому час у статусі «Неминуча проблема» скорочується до 2,43 год. Натомість комбіноване заряджання (непіковий час + V2H) у цих умовах виявляється неприйнятним для системи: трансформатор функціонує у критичному режимі понад 1146 годин на рік, що майже напевно призведе до його виходу з ладу.

При повному (100 %) проникненні електромобілів найгірші результати демонструє заряджання на вимогу: високий рівень зношення трансформатора, значна тривалість перебування в аварійних режимах, і як наслідок – висока ймовірність його передчасного виходу з ладу.

Застосування комбінованої стратегії (непіковий час + V2H) є абсолютно непридатним у таких умовах, оскільки тривалість критичного стану перевищує 1300 годин на рік.

Оптимальним варіантом виявляється просте заряджання в непікові години: хоча тривалість потенційно проблемного режиму залишається великою, найнебезпечніший стан виникає рідше й триває суттєво менше. Отже, цей режим забезпечує значно менше зношення трансформатора і є безпечнішим у довгостроковій перспективі.

Таблиця 4 – Режими роботи трансформатора та LoL за цілий рік

Сценарій	Рівень проникнення ЕМ, %	Час перебування виходу в статусі, год.				F_{EqA}	LoL _y , %
		Немає проблеми	Увага	Можлива проблема	Неминуча проблема		
Сценарій 1	15	5918.75	2749.82	91.43	0.0	0.0007	0.0033
	33	5258.3	3341.17	160.53	0.0	0.0029	0.0139
	50	4716.5	3680.47	363.04	0.0	0.0191	0.0931
	67	4360.86	3690.69	706.08	2.36	0.0697	0.3394
	85	4090.55	3384.35	1221.14	63.96	0.4057	1.9743
	100	3938.04	3088.23	1447.21	286.52	1.8433	8.9709
Сценарій 2	15	6143.21	2535.0	81.8	0.0	0.0004	0.0018
	33	5945.34	2731.45	83.21	0.0	0.0006	0.0029
	50	5176.1	3487.25	96.18	0.0	0.0016	0.0076
	67	4522.5	3839.22	398.28	0.0	0.0093	0.0455
	85	4188.6	3646.26	922.72	2.43	0.1076	0.5239
	100	4004.38	3259.24	1368.82	127.56	0.8831	4.2978
Сценарій 3	15	6237.77	2441.24	80.76	0.0	0.0002	0.0011
	33	5594.01	3070.72	95.27	0.0	0.0009	0.0045
	50	5046.93	3140.98	571.67	0.41	0.0477	0.2324
	67	4810.83	2615.79	877.42	455.96	3.004	14.6193
	85	4652.41	2467.57	493.1	1146.92	Failure	Failure
	100	4555.1	2396.99	425.99	1381.92	Failure	Failure

Для успішного розгортання електромобільної інфраструктури критично важливо правильно обирати стратегії заряджання, з урахуванням ресурсу трансформаторів. У разі невисокого проникнення ЕМ (до 50 %) практично будь-яка стратегія є прийнятною й залежить передусім від економічної доцільності. Водночас за умов зростання частки електромобілів пріоритетними стають режими, що знижують навантаження в пікові години.

Зокрема, заряджання в непіковий час краще захищає обладнання від перевантажень, тому його рекомендовано застосовувати у випадках, коли проникнення ЕМ сягає 85 % і більше. Для стимулювання такого підходу можна впроваджувати гнучкі тарифи, а також використовувати освітні та поведінкові методики для залучення споживачів до оптимального розподілу навантажень у часі.

Висновки. Ненормальні умови експлуатації трансформаторів зокрема перевантаження, перегрів і погана якість електроенергії пришвидшують їх зношення та скорочують строк служби, що негативно впливає на стабільність електропостачання. У цьому дослідженні акцент зроблено на важливості трансформаторів у системі енергозабезпечення та необхідності їх стабільної роботи. Під час аналізу оцінено, як різні підходи до заряджання електромобілів впливають на старіння обладнання, зокрема через сценарії заряджання на вимогу, у непіковий час та із застосуванням технологій V2H. Мета зрозуміти характер впливу цих стратегій і використати це для покращення роботи трансформаторів у майбутньому. Було розроблено інструмент на основі нечіткої логіки, який відображає стан трансформатора залежно від рівня проникнення електромобілів із заряджанням від мережі та обраної стратегії підзарядки. Запропонований алгоритм включає два контролери на основі нечіткої логіки.

Перший контролер відповідає за діагностику та генерує попереджувальні повідомлення: «Проблем немає», «Попередження», «Можлива проблема», «Неминуча проблема». Такі сигнали можуть використовуватись оператором розподільчої системи для передбачення перегріву трансформатора та вживання запобіжних заходів для запобігання аварії.

Другий контролер спрямований на поліпшення коефіцієнта потужності шляхом регулювання потужності від PV, а також на зменшення перевантаження трансформатора за рахунок реверсивних потоків енергії.

Ефективність цього інструмента була протестована на радіальній розподільчій мережі з трансформатором, зануреним у мінеральне масло, який обслуговує житлових споживачів та локальне підприємство. Результати моделювання показали суттєвий вплив стратегій заряджання електромобілів на показник втрати ресурсу трансформатора. Висновки підкреслюють важливість проактивного керування процесом заряджання ЕМ для забезпечення надійності та довговічності трансформаторів, що сприяє підвищенню загальної ефективності електричної мережі.

Для рівнів проникнення ЕМ до 50 % режими заряджання/розряджання можуть обиратися на основі економічної вигоди та експлуатаційних умов, за підтримки функцій vehicle-to-grid (V2G) або vehicle-to-home (V2H).

За рівня проникнення понад 50 % індекс втрати ресурсу трансформатора LoL суттєво зростає. Режим непіковий час + V2H стає неприйнятним вже при 67 % проникнення ЕМ і при подальшому зростанні неминуче призводить до виходу трансформатора з ладу, що ставить під загрозу надійність всієї енергосистеми.

Традиційний режим заряджання на вимогу не призводить до миттєвого виходу трансформатора з ладу, але суттєво погіршує його стан. Тому при великій кількості ЕМ доцільно віддавати перевагу простим непіковим стратегіям, що дозволяють відкласти дорогі модернізації та підсилення мереж.

При 100 % проникненні ЕМ оцінений індекс LoL у 2,1 рази нижчий для непікового режиму порівняно з заряджанням на вимогу. Отже, слід використовувати різні стратегії заряджання/розряджання для уникнення або відтермінування дорогих оновлень системи. Потенційні практичні переваги запропонованого підходу включають: покращення профілактичного обслуговування трансформаторів; оптимізацію графіків заряджання електромобілів; сприяння у плануванні модернізації розподільчих мереж; підтримку операційного планування операторів системи розподілу.

У майбутніх дослідженнях необхідно буде враховувати зміни тарифів на електроенергію, а також моделі заряджання різних комерційних типів електромобілів, що дозволить точніше відображати реальні процеси в енергомережах.

Подяка. Роботу виконано за підтримки науково-дослідної роботи з державним реєстраційним номером 2023.04/0131.

Список літератури

1. Richardson P., Flynn D., Keane A. Impact assessment of varying penetrations of electric vehicles on low voltage distribution systems. *Energy Society General Meeting*, Minneapolis, MN, 25–29 July 2010. P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/pes.2010.5589940>.
2. Parodi A. Global electric vehicle sales up 25% in record 2024. *Reuters*. URL: <https://www.reuters.com/business/autos-transportation/global-electric-vehicle-sales-up-25-record-2024-2025-01-14/> (дата звернення: 30.03.2025).
3. International Energy Agency. Global EV Outlook 2024. 2024. URL: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2024>.
4. Ноздренков В. С., Дяговченко І. М., Петровський М. В. Методологія аналізу впливу електромобілів на розподільчу мережу: теоретичний підхід. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. 2024. № 2 (9). С. 36–46. DOI: [https://doi.org/10.20998/erec.2024.2\(9\).317648](https://doi.org/10.20998/erec.2024.2(9).317648).
5. Hong S.-K., Lee S. G., Kim M. Assessment and mitigation of electric vehicle charging demand impact to transformer aging for an apartment complex. *Energies*. 2020. Vol. 13, no. 10. 2571. DOI: <https://doi.org/10.3390/en13102571>.
6. Net emission reductions from electric cars and heat pumps in 59 world regions over time / F. Knobloch et al. *Nature Sustainability*. 2020. Vol. 3, no. 6. P. 437–447. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41893-020-0488-7>.
7. Wang J., Cui Y., Zhu M. Probabilistic harmonic calculation in distribution networks with electric vehicle charging stations. *Journal*

- of *Applied Mathematics*. 2014. Vol. 2014. P. 1–11. DOI: <https://doi.org/10.1155/2014/167565>.
8. Impact of electric vehicle charging station on power quality / M. S. Arjun et al. *International Journal of Applied Power Engineering (IJAPE)*. 2024. Vol. 13, no. 1. P. 186–193. DOI: <https://doi.org/10.11591/ijape.v13.i1.pp186-193>.
 9. Sivaraman P., Raj J. S. S., Kumar P. A. Power quality impact of electric vehicle charging station on utility grid. *2021 IEEE Madras Section Conference (MASCOS)*, Chennai, India, 27–28 August 2021. P. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1109/mascon51689.2021.9563528>.
 10. Leou R.-C., Su C.-L., Lu C.-N. Stochastic analyses of electric vehicle charging impacts on distribution network. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2014. Vol. 29, no. 3. P. 1055–1063. DOI: <https://doi.org/10.1109/tpwrs.2013.2291556>.
 11. Affonso C. M., Yan Q., Kezunovic M. Risk assessment of transformer loss-of-life due to PEV charging in a parking garage with PV generation. *2018 IEEE power & energy society general meeting (PESGM)*, Portland, OR, USA, 5–10 August 2018. P. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.1109/pesgm.2018.8586581>.
 12. Woo S., Bae S., Moura S. J. Pareto optimality in cost and service quality for an Electric Vehicle charging facility. *Applied Energy*. 2021. Vol. 290. P. 116779. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116779>.
 13. Heo J., Chang S. Optimal planning for electric vehicle fast charging stations placements in a city scale using an advantage actor-critic deep reinforcement learning and geospatial analysis. *Sustainable Cities and Society*. 2024. P. 105567. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105567>.
 14. Argade S., Aravinthan V., Jewell W. Probabilistic modeling of EV charging and its impact on distribution transformer loss of life. *2012 IEEE International Electric Vehicle Conference (IEVC)*, Greenville, SC, USA, 4–8 March 2012. P. 1–8. DOI: <https://doi.org/10.1109/ievc.2012.6183209>.
 15. Vivas F. J., Segura F., Andújar J. M. Fuzzy logic-based energy management system for grid-connected residential DC microgrids with multi-stack fuel cell systems: a multi-objective approach. *Sustainable Energy, Grids and Networks*. 2022. Vol. 32. P. 100909. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.segan.2022.100909>.
 16. Azzopardi B., Gabdullin Y. Impacts of electric vehicles charging in low-voltage distribution networks: a case study in Malta. *Energies*. 2024. Vol. 17, no. 2. P. 289. DOI: <https://doi.org/10.3390/en17020289>.
 17. Day-Ahead forecast of electric vehicle charging demand with deep neural networks / G. Van Kriekinge et al. *World Electric Vehicle Journal*. 2021. Vol. 12, no. 4. P. 178. DOI: <https://doi.org/10.3390/wevj12040178>.
 18. Electric vehicle-to-grid (V2G) technologies: impact on the power grid and battery / M. R. H. Mojumder et al. *Sustainability*. 2022. Vol. 14, no. 21. P. 13856. DOI: <https://doi.org/10.3390/su142113856>.
 19. An D., Cui F., Kang X. Optimal scheduling for charging and discharging of electric vehicles based on deep reinforcement learning. *Frontiers in Energy Research*. 2023. Vol. 11. P. 1273820. DOI: <https://doi.org/10.3389/fenrg.2023.1273820>.
 20. Techno-economic analysis of the distribution system with integration of distributed generators and electric vehicles / N. K. Golla et al. *Frontiers in Energy Research*. 2023. Vol. 11. P. 1221901. DOI: <https://doi.org/10.3389/fenrg.2023.1221901>.
 21. Firouzzah K. G. Profit-based electric vehicle charging scheduling: comparison with different strategies and impact assessment on distribution networks. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2022. Vol. 138. P. 107977. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2022.107977>.
 22. International Energy Agency, “Global EV Outlook 2024”, Apr. 2024. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2024>
 23. V. Nozdrenkov, I. Diahovchenko, and M. Petrovskiy, “Methodology for analyzing the impact of electric vehicles on distribution networks: A theoretical approach”, *Bulletin of the National Technical University “KhPI”. Series: Energy: Reliability and Energy Efficiency*, no. 2 (9), pp. 36–46, Dec. 2024, doi: [https://doi.org/10.20998/erec.2024.2\(9\).317648](https://doi.org/10.20998/erec.2024.2(9).317648) (in Ukrainian)
 24. S.-K. Hong, S. G. Lee, and M. Kim, “Assessment and mitigation of electric vehicle charging demand impact to transformer aging for an apartment complex”, *Energies*, vol. 13, no. 10, May 2020, Art. no. 2571, doi: <https://doi.org/10.3390/en13102571>
 25. F. Knobloch et al., “Net emission reductions from electric cars and heat pumps in 59 world regions over time”, *Nature Sustainability*, vol. 3, no. 6, pp. 437–447, Mar. 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1038/s41893-020-0488-7>
 26. J. Wang, Y. Cui, and M. Zhu, “Probabilistic harmonic calculation in distribution networks with electric vehicle charging stations”, *Journal of Applied Mathematics*, vol. 2014, 2014, Art. no. 167565, doi: <https://doi.org/10.1155/2014/167565>
 27. M. S. Arjun, N. Mohan, K. R. Sathish, A. Patil, and G. Thanmayi, “Impact of electric vehicle charging station on power quality”, *International Journal of Applied Power Engineering (IJAPE)*, vol. 13, no. 1, pp. 186–193, Mar. 2024, doi: <https://doi.org/10.11591/ijape.v13.i1.pp186-193>
 28. P. Sivaraman, J. S. S. Raj, and P. A. Kumar, “Power quality impact of electric vehicle charging station on utility grid”, in *2021 IEEE Madras Section Conference (MASCOS)*, Chennai, India, Aug. 27–28, 2021. n.d., pp. 1–4, doi: <https://doi.org/10.1109/mascon51689.2021.9563528>
 29. R.-C. Leou, C.-L. Su, and C.-N. Lu, “Stochastic analyses of electric vehicle charging impacts on distribution network”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 29, no. 3, pp. 1055–1063, May 2014, doi: <https://doi.org/10.1109/tpwrs.2013.2291556>
 30. C. M. Affonso, Q. Yan, and M. Kezunovic, “Risk assessment of transformer loss-of-life due to PEV charging in a parking garage with PV generation”, in *2018 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM)*, Portland, OR, USA, Aug. 5–10, 2018, pp. 1–5, doi: <https://doi.org/10.1109/pesgm.2018.8586581>
 31. S. Woo, S. Bae, and S. J. Moura, “Pareto optimality in cost and service quality for an Electric Vehicle charging facility”, *Applied Energy*, vol. 290, May 2021, Art. no. 116779, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116779>
 32. J. Heo and S. Chang, “Optimal planning for electric vehicle fast charging stations placements in a city scale using an advantage actor-critic deep reinforcement learning and geospatial analysis”, *Sustainable Cities and Society*, Jul. 2024, Art. no. 105567, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105567>
 33. S. Argade, V. Aravinthan, and W. Jewell, “Probabilistic modeling of EV charging and its impact on distribution transformer loss of life”, in *2012 IEEE International Electric Vehicle Conference (IEVC)*, Greenville, SC, USA, Mar. 4–8, 2012, pp. 1–8, doi: <https://doi.org/10.1109/ievc.2012.6183209>
 34. F. J. Vivas, F. Segura, and J. M. Andújar, “Fuzzy logic-based energy management system for grid-connected residential DC microgrids with multi-stack fuel cell systems: A multi-objective approach”, *Sustainable Energy, Grids and Networks*, vol. 32, Aug. 2022, Art. no. 100909, doi: <https://doi.org/10.1016/j.segan.2022.100909>
 35. B. Azzopardi and Y. Gabdullin, “Impacts of electric vehicles charging in low-voltage distribution networks: A case study in Malta”, *Energies*, vol. 17, no. 2, Jan. 2024, Art. no. 289, doi: <https://doi.org/10.3390/en17020289>
 36. G. Van Kriekinge, C. De Cauwer, N. Sapountzoglou, T. Coosemans, and M. Messagie, “Day-Ahead forecast of electric vehicle charging demand with deep neural networks”, *World Electric Vehicle Journal*, vol. 12, no. 4, Oct. 2021, Art. no. 178, doi: <https://doi.org/10.3390/wevj12040178>
 37. M. R. H. Mojumder, F. Ahmed Antara, M. Hasanuzzaman, B. Alamri, and M. Alsharef, “Electric vehicle-to-grid (V2G) technologies: Impact on the power grid and battery”, *Sustainability*, vol. 14, no. 21, Oct. 2022, Art. no. 13856, doi: <https://doi.org/10.3390/su142113856>
 38. D. An, F. Cui, and X. Kang, “Optimal scheduling for charging and discharging of electric vehicles based on deep reinforcement

References

1. P. Richardson, D. Flynn, and A. Keane, “Impact assessment of varying penetrations of electric vehicles on low voltage distribution systems”, in *Energy Society General Meeting*, Minneapolis, MN, Jul. 25–29, 2010. n.d., pp. 1–6, doi: <https://doi.org/10.1109/pes.2010.5589940>
2. A. Parodi. “Global electric vehicle sales up 25% in record 2024.” Reuters. Accessed: Mar. 30, 2025. [Online]. Available: <https://www.reuters.com/business/autos-transportation/global-electric-vehicle-sales-up-25-record-2024-2025-01-14/>

- learning”, *Frontiers in Energy Research*, vol. 11, Oct. 2023, Art. no. 1273820, doi: <https://doi.org/10.3389/fenrg.2023.1273820>
20. N. K. Golla *et al.*, “Techno-economic analysis of the distribution system with integration of distributed generators and electric vehicles”, *Frontiers in Energy Research*, vol. 11, Jul. 2023, Art. no. 1221901, doi: <https://doi.org/10.3389/fenrg.2023.1221901>
21. K. G. Firouzjah, “Profit-based electric vehicle charging scheduling: Comparison with different strategies and impact assessment on distribution networks”, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 138, Jun. 2022, Art. no. 107977, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2022.107977>

Надійшла (received) 28.04.2025

UDC 621.314:621.316.17

NOZDRENKOV VALERII ✉ – Candidate of Technical Sciences (PhD), Docent, Postdoctoral Researcher at the Department of Computer Science and Systems Analysis, Cherkasy State Technological University; Cherkasy, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-0579-6821>; e-mail: v.s.nozdrenkov.d24@chdtu.edu.ua.

DIAHOVCHENKO ILLIA – Candidate of Technical Sciences (PhD), Docent, Associate Professor of the Electric Power Engineering Department; Sumy State University; Sumy, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8575-8280>; e-mail: i.diahovchenko@etech.sumdu.edu.ua.

PETROVSKYI MYKHAILO – Candidate of Physical and Mathematical Sciences (PhD), Docent, Associate Professor of the Electric Power Engineering Department; Sumy State University; Sumy, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0387-3136>; e-mail: m.petrovskyi@etech.sumdu.edu.ua.

OPTIMAL ELECTRIC VEHICLE CHARGING METHOD CONSIDERING IMPACT ON DISTRIBUTION NETWORKS, TRANSFORMER LIFESPAN, AND POWER QUALITY

The increasing popularity of electric vehicles and their widespread adoption in everyday life present numerous technical and operational challenges for electric distribution networks, particularly their critical components, such as distribution transformers. High peak loads caused by uncontrolled electric vehicles charging processes can lead to overloads and reduced equipment lifespan, increasing infrastructure maintenance and modernization costs. This paper discusses and proposes a practically oriented method for optimal charging of electric vehicles based on a comprehensive approach using fuzzy logic. This approach enables a detailed assessment of the charging processes' impact on distribution networks, including analysis of harmonic voltage distortions, temperature operating conditions, and variable transformer loading levels. The study examines various charging scenarios: on-demand charging, off-peak charging, and a combined mode employing Vehicle-to-Home (V2H) technology for bidirectional energy exchange between the electric vehicles and household. The analysis results demonstrate that optimizing charging schedules significantly reduces the risk of network and transformer overloads, decreases their ageing rate, ensures higher power quality, and enables avoiding or substantially reducing financial costs associated with energy infrastructure upgrades. The proposed method considers local operational conditions, facilitating its effective implementation in actual electricity distribution systems by adapting to individual user requirements and network specifics.

Keywords: electric vehicle, optimal charging, distribution networks, transformer, fuzzy logic, peak load, power quality, Vehicle-to-Home.

НОЗДРЕНКОВ ВАЛЕРІЙ СТАНІСЛАВОВИЧ ✉ – кандидат технічних наук, доцент, докторант кафедри комп'ютерних наук та системного аналізу, Черкаський державний технологічний університет; м. Черкаси, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-0579-6821>; e-mail: v.s.nozdrenkov.d24@chdtu.edu.ua.

ПАВЛОВ АНДРІЙ ВОЛОДИМИРОВИЧ – кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри комп'ютеризованих систем управління, Сумський державний університет, м. Суми, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-8861-8472>; e-mail: a.pavlov@ksu.sumdu.edu.ua.

ОЛЕКСІЄНКО ГАЛИНА АНДРІЙВНА – кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних наук, Сумський державний університет, м. Суми, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0274-5095>; e-mail: galyana2@ukr.net.

ЖУРАВЛЬОВ ОЛЕКСАНДР ЮРІЙОВИЧ – кандидат технічних наук, доцент, старший викладач кафедри комп'ютеризованих систем управління, Сумський державний університет, м. Суми, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-7834-6661>; e-mail: san.75@i.ua.

КОРЕНЕВ МИКОЛА ІВАНОВИЧ – інженер-програміст, ТОВ «НЕТКРЕКЕР», м. Суми, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-6929-7281>; e-mail: nikolaj.korenev99@gmail.com

АДАПТИВНЕ ТРЬОХПОЗИЦІЙНЕ КЕРУВАННЯ ВЕНТИЛЯЦІЄЮ В ПРИМІЩЕННЯХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПІДПРИЄМСТВ ІЗ РИЗИКОМ НАКОПИЧЕННЯ ВИБУХОНЕБЕЗПЕЧНИХ ГАЗІВ

У статті розглядається методика трьохпозиційного дискретного керування вентиляційною системою приміщень енергетичних підприємств із підвищеним ризиком утворення вибухонебезпечного газового середовища. Основну увагу приділено двом типовим джерелам газоутворення: метану – у приміщеннях із газовими електрогенераторами, та водню – в акумуляторних залах, що утворюється під час заряджання свинцево-кислотних батарей. Запропоновано підхід до переходу від двопозиційного («On-Off») до трьохпозиційного керування вентиляційним приводом на основі адаптаційної характеристики, отриманої для ПІД-регулятора з заданими параметрами. Реалізація керування здійснюється за допомогою асинхронного електродвигуна зі схемою перемикачів «зірка-трикутник-вимкнено», що дозволяє дискретно змінювати режим роботи витяжної вентиляції. Автоматизація системи передбачає використання пристрою інтернету речей з функціями підключення до локальної інформаційно-керуючої мережі, контролем температури та наявності полум'я, а також передачі даних за допомогою промислового протоколу ModBus TCP. Моделювання функціонування системи виконано в середовищі MATLAB Simulink, де реалізовано підсистему адаптивної характеристики, її перетворення у трьохпозиційний керуючий сигнал і динамічну модель поведінки системи вентиляції при змінній концентрації газів. Отримані результати демонструють стабільну роботу вентиляції, ефективне зниження концентрацій вибухонебезпечного газу, а також зменшення енергоспоживання за рахунок оптимізації режимів роботи вентилятора. Запропонована методика дозволяє адаптувати класичні алгоритми керування до умов дискретного режиму роботи виконавчих механізмів, а також інтегрувати вентиляційні підсистеми в сучасну інфраструктуру автоматизованого об'єкта енергетичного комплексу.

Ключові слова: трьохпозиційне дискретне керування; вентиляційна система; вибухонебезпечні гази; метан; водень; газові генератори; акумуляторні зали; ПІД-регулятор; інтернет речей (IoT); автоматизація; MATLAB Simulink; ModBus TCP; енергоефективність; енергетичні підприємства.

Вступ. Забезпечення нормативного рівня якості повітря в приміщеннях енергетичних підприємств, де експлуатуються газове або електрохімічне обладнання, є одним із пріоритетних завдань промислової безпеки, екологічної відповідальності та енергоефективності. Особливої уваги потребують ситуації, пов'язані з можливим витоком метану – у приміщеннях з газогенераторами, та водню – в акумуляторних залах, де він утворюється в процесі заряджання батарей. З огляду на високу вибухонебезпечність цих газів, актуальним є впровадження надійних і технологічно адаптивних вентиляційних систем, здатних не лише оперативно реагувати на зміну параметрів повітряного середовища, а й забезпечувати раціональне використання енергоресурсів.

У сучасних умовах промислової автоматизації спостерігається інтенсивне впровадження систем, що базуються на принципах інтернету речей (IoT), використанні інтелектуальних виконавчих пристроїв та віддаленого серверного керування. Однак, реальні технічні обмеження, такі як використання двигунів із

фіксованими режимами роботи (наприклад, «вимкнено – з'єднання обмоток “зірка” – з'єднання обмоток “трикутник”»), суттєво ускладнюють реалізацію класичних алгоритмів керування, які ґрунтуються на безперервному регулюванні. Це зумовлює потребу в розробці адаптивних підходів до формування керуючих впливів у дискретному режимі.

Одним із перспективних підходів є використання так званих адаптаційних характеристик, що дають змогу реалізувати дискретну апроксимацію опорного алгоритму керування (наприклад, ПІ чи ПІД-регулятора) для систем, в яких можлива лише трьохпозиційна подача керуючої дії. Такий підхід дозволяє зберегти динамічні переваги класичних алгоритмів при обмеженому наборі виконавчих режимів, що особливо важливо для вентиляційних систем із мінімальним енергоспоживанням.

Метою цієї роботи є дослідження та практична реалізація методу використання адаптивної характеристики для забезпечення трьохпозиційного дискретного керування витяжною вентиляцією в

© В. С. Ноздренков, А. В. Павлов, Г. А. Олексієнко, О. Ю. Журавльов, М. І. Коренев, 2025



Ця робота ліцензується відповідно до **Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)**
Конфлікт інтересів: Автори заявили про відсутність конфлікту

окремій зоні промислового приміщення з газовим обладнанням. У дослідженні акцент зроблено на побудові аналітичної моделі об'єкта керування, описі архітектури керувальної системи на базі IoT-рішень та реалізації моделі у середовищі MATLAB Simulink, з подальшим аналізом динаміки системи та ефективності впровадженого алгоритму.

Запропонований підхід дозволяє не лише підвищити енергоефективність та точність регулювання, а й значно спростити серверну реалізацію системи, що є важливим чинником при впровадженні подібних рішень в умовах обмеженого бюджету та ресурсів.

Мета статті. Метою даної наукової статті є розробка, аналітичне обґрунтування та практична реалізація методу використання адаптаційних характеристик у задачі трьохпозиційного дискретного керування витяжною вентиляцією у приміщеннях енергетичних підприємств. Дослідження передбачає формалізацію процесу регулювання концентрації вибухонебезпечних газів, побудову математичної моделі об'єкта керування із врахуванням інерційних властивостей повітряного середовища, а також трансформацію класичного ПД-регулятора до вигляду, що забезпечує ефективну роботу в умовах обмеженого (трьохпозиційного) режиму виконавчого пристрою.

Особливу увагу приділено розробці адаптаційної характеристики, яка дозволяє апроксимувати безперервний регулятор у дискретній реалізації з фіксованими рівнями потужності, що відповідають режимам роботи асинхронного двигуна типу «вимкнено–зірка–трикутник». У роботі також розглядається серверно-клієнтська архітектура реалізації системи на базі IoT-технологій із використанням протоколу Modbus TCP, що забезпечує масштабованість, гнучкість та надійність системи передачі даних.

Застосування створеного методу проілюстровано за допомогою комп'ютерного моделювання в середовищі MATLAB Simulink, результати якого дозволяють оцінити динамічні характеристики системи, ефективність перехідних процесів та енергоефективність реалізованого підходу. Отримані результати мають прикладну цінність для впровадження в реальні промислові системи вентиляції, зокрема, в умовах, де техніко-економічні обмеження не дозволяють використовувати складні багатопозиційні або безперервні схеми регулювання.

Огляд літературних джерел. У сучасній науково-технічній літературі значна увага приділяється проблемам контролю якості повітря в робочому середовищі. Основний акцент робиться на виявленні вмісту пилу, диму, шкідливих газів, таких як метан, CO, NO₂, SO₂, та інших, які впливають на безпеку та комфорт перебування людини у приміщенні. Запропоновані підходи охоплюють широкий спектр засобів: від систем фільтрації та вентиляції до зволоження та озонування повітря.

У роботі [1] розроблена система моніторингу та управління в реальному часі, яка керується датчиком та

модулем коротких повідомлень глобальної системи мобільного зв'язку для виявлення викиду горючого газу.

Дослідження [2] присвячене створенню недорогої системи моніторингу якості повітря на основі IoT, як доказ концепції для захоплення та визначення концентрації шкідливих газів у приміщеннях та, залежно від рівня їхньої концентрації, подачі сигналів тривоги та повідомлень, включення вентилятора та/або відкриття дверей.

У роботі [3] представлено розробку та перевірку алгоритму управління, який адаптується до динаміки системи HVAC з використанням вентиляції з управлінням за потребою на основі датчиків. Стратегія управління, заснована на моніторингу та моделюванні концентрації вуглекислого газу (CO₂) у приміщенні, застосовується для реагування на зміни генерації CO₂ у приміщенні за допомогою відповідного регулювання швидкості вентиляції, тобто швидкість вентиляції модулюється з часом на основі сигналів від концентрації CO₂ у приміщенні. Зокрема, у статті основна увага приділяється розробці адаптивної моделі якості повітря в приміщенні на основі прогнозування кількості людей, що знаходяться в приміщенні, в реальному часі для реалізації стратегій управління.

У [4] представлено систему автоматизованого моніторингу якості повітря в приміщенні, якою можна керувати та моніторити за допомогою мобільного телефону, що базується на концепції Інтернету речей. Система періодично контролює стан повітря в приміщенні та може керуватися за допомогою смартфона. Система працює на платформі Інтернету речей, яка забезпечує віддалений доступ через мобільний телефон. Запропонована система контролює рівень CO та CO₂ у приміщенні та повідомляє користувача, якщо він перевищує допустиму межу. Користувач може ввімкнути вентилятор зі смартфона. Ця система була реалізована за допомогою Raspberry Pi, який використовує базу даних для зберігання контрольованих значень та веб-сервер, до якого можна отримати доступ через смартфон.

Систематичний огляд [5] узагальнює сучасні IoT-системи моніторингу повітря: більшість з них зосереджена на контролі теплового комфорту, CO₂ та зважених частинок. Найпоширеніші платформи – Arduino та Raspberry Pi.

У статтях [6–8] акцентовано увагу на віддаленому доступі до даних у реальному часі, використанні хмарних платформ та зменшенні енергоспоживання. У [9, 10] розглянуто технології точного виявлення метану від закритих камер до недисперсійної інфрачервоної спектроскопії.

Інтелектуальне регулювання вентиляції з нечіткою логікою, розглянуте в [11], забезпечує не лише контроль якості повітря, а й оптимізацію енергоспоживання. Аналіз викидів метану в побуті, виконаний у [12], вказує на значні втрати пального у звичайних умовах експлуатації.

У працях [13–15] досліджуються системи виявлення газів на основі мікроконтролерів, що використовують датчики типу MQ та протоколи

бездротового передавання даних. Ці рішення характеризуються доступністю, простотою реалізації та придатністю для широкого кола застосувань.

Разом з тим, більшість наявних рішень орієнтовані переважно на виявлення концентрації газів, а не на ефективне керування вентиляцією в умовах обмеженого (дискретного) режиму роботи виконавчих пристроїв. Метод адаптаційних характеристик, запропонований у [16], дозволяє трансформувати безперервні алгоритми (типу ПД) у форму, придатну для трьохпозиційного керування, що є особливо актуальним у випадках з електроприводами, які працюють за схемою «вимкнено–зірка–трикутник».

Таким чином, потреба у створенні адаптивних, простих і надійних систем дискретного керування вентиляцією залишається актуальною і є предметом подальшого дослідження в цій роботі.

Опис причинно-наслідкових зв'язків в об'єкті керування. У якості об'єкта керування розглянуто окрему зону промислового приміщення (зокрема – приміщення з газовими генераторами або акумуляторну кімнату підстанції), обладнану точковим витяжним вентиляційним пристроєм. Його функціональне призначення полягає у підтриманні допустимого рівня концентрації природного газу CH_4 або водню H_2 шляхом керованого видалення повітряної суміші. У подальшому виклад матеріалу орієнтований на випадок контролю метану, як характерного для приміщень з газогенераторами; усі розрахункові та алгоритмічні рішення залишаються аналогічними для ситуацій із контролем концентрації водню в акумуляторних приміщеннях. Аналіз динаміки цього процесу виконано на основі причинно-наслідкових зв'язків, які візуалізовано на рис. 1 відповідно до методики, запропонованої у [16].

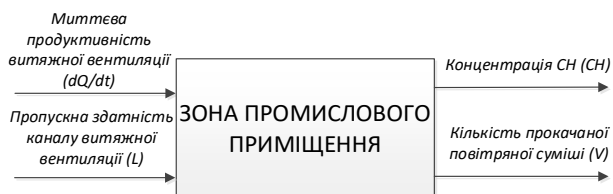


Рисунок 1 – Графічне представлення зони промислового приміщення та його входних і вихідних параметрів

У межах цієї моделі входними параметрами системи виступають миттєва продуктивність витяжної вентиляції dQ/dt та пропускна здатність вентиляційного каналу L . Водночас вихідними параметрами є концентрація метану в повітрі CH_4 і об'єм прокачаної повітряної суміші V .

Для спрощення математичного опису підсистеми приймаються кілька припущень, які дозволяють формалізувати причинно-наслідкові зв'язки між параметрами. Зокрема, вважається, що об'єм повітряної суміші V , необхідний для зниження концентрації метану CH_4 до заданого рівня, є пропорційним миттєвій продуктивності витяжної вентиляції dQ/dt . Крім того, сам процес зміни концентрації газу має інерційний характер і може бути описаний передатною функцією аперіодичної ланки

першого порядку з постійною часу T_R та коефіцієнтом перетворення k_R .

Структурна схема підсистеми вентиляції зони промислового приміщення. Враховуючи наведене вище щодо формалізованого опису процесу керування якістю повітря у зоні приміщення, можна структурно представити відповідну підсистему у вигляді структурної схеми (рис. 2). Головною особливістю практичної реалізації даної системи керування є те, що у якості основного виконуючого пристрою використовується система, побудована на основі асинхронного двигуна змінного струму, швидкість обертання якого підлягає трьохпозиційному регулюванню («вимкнено–трикутник–зірка»), тому відповідне дозування кількості прокачаної повітряної суміші у часі можна реалізувати лише завдяки регламентованому повному включенню приводу (схема з'єднання обмоток «зірка»), переключенню його на схему з'єднання обмоток «трикутник» або повному відключенню відповідного двигуна.



Рисунок 2 – Графічне представлення зони промислового приміщення та його входних і вихідних параметрів

Реалізація автоматичного керування вентиляційною системою здійснюється за допомогою IoT-пристрою, який оснащений низкою інтегрованих функціональних можливостей. Зокрема, пристрій підтримує підключення до локальної мережі приміщення, забезпечує вимірювання температури та виявлення наявності полум'я в зоні розташування, а також виконує релейне керування обмотками асинхронного електродвигуна – з можливістю вмикання, вимикання або перемикавання між режимами живлення.

Обмін даними з зовнішнім сервером або сервісною платформою здійснюється за допомогою промислового комунікаційного протоколу Modbus TCP, що забезпечує високу надійність і стандартизовану інтеграцію в системи автоматизації.

Формування керуючого сигналу в системі передбачає використання адаптаційної характеристики, отриманої на основі принципу «ввімкнено–вимкнено» («On–Off»), як проміжного етапу для реалізації трьохпозиційного алгоритму керування. Такий підхід дозволяє врахувати інерційність об'єкта та забезпечити поступовий перехід від класичного двопозиційного регулювання до більш гнучкого трьохпозиційного керування режимами роботи вентиляційної системи. Для подальшого синтезу регулятора передбачається використання адаптаційної характеристики, представленої на рис. 3, з її подальшою інтерпретацією у дискретний тривірневий режим роботи виконавчого механізму, що наведено на рис. 4, відповідно до методичних підходів, запропонованих у [16]. Така

адаптація дозволяє оптимізувати енергоспоживання вентиляційної системи, забезпечити стабільне підтримання заданого рівня концентрації метану у повітряній суміші, а також підвищити загальну ефективність роботи системи.

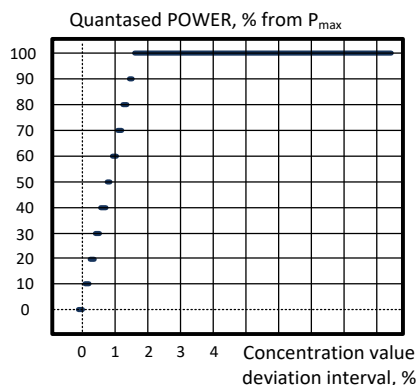


Рисунок 3 – Приклад адаптаційної характеристики для дискретного режиму роботи вентиляції при використанні у якості опорного алгоритму керування ПІД-регулятора з параметрами $P = 12$, $I = 12$, $D = 0.1$, $N = 200$

Цей варіант адаптаційної характеристики є апроксимацією ПІД-алгоритму керування з раніше визначеними параметрами регулятора. Відповідні дискретизовані значення для реалізації трьохпозиційного керування наведено у табл. 1.

Розподіл функцій системи керування у межах зони промислового приміщення здійснено таким чином: програмна частина (Soft) відповідає за адаптацію параметрів і моніторинг на сервері, інтегрованому у спільну локальну мережу, забезпечуючи централізоване управління процесами вентиляції та обробку даних. Безпосереднє вимірювання параметрів реалізується за допомогою спорідненого IoT-блоку на основі газосигналізатора «ВАРТА 2-03А» (виробництва ТОВ «ТЕМІО»), що працює в межах mesh-мережі. Даний блок оснащений додатковим інтерфейсним модулем для зв'язку з системою та обробки отриманих даних у реальному часі, що дозволяє підвищити оперативність реагування на зміну концентрації газу у приміщенні. Такий підхід

забезпечує підвищену гнучкість системи керування, її масштабованість та стійкість до локальних збоїв у мережі.

Таблиця 1 – Апроксимація ПІД - алгоритму

Інтервал відхилень значень концентрації, %	Потужність привода вентиляційної системи, %
0–0.055	0
0.055–0.222	10
0.222–0.381	20
0.381–0.550	30
0.550–0.719	40
0.719–0.888	50
0.888–1.057	60
1.057–1.227	70
1.227–1.396	80
1.396–1.565	90
1.565 та більше	100

Загальний опис роботи системи вентиляції в дискретному (трьохпозиційному) режимі. Для реалізації дозованої прокачки повітряної суміші в системі вентиляції, що функціонує виключно в трьохпозиційному режимі, передбачається використання механізму керування, сформованого на основі адаптаційної характеристики. Режим роботи системи визначається у межах заздалегідь встановленого безпечного інтервалу часу, наприклад 20 хвилин, протягом якого зміна станів вентиляції відбувається лише на його межах, щоб уникнути частих перемикачів, передчасного зношування обладнання та забезпечити необхідну інерційність процесу (рис. 5). Значення потужності, отримані шляхом квантованої інтерпретації адаптаційної характеристики, співвідносяться з режимами роботи асинхронного двигуна: значення в межах 100 % відповідають включенню обмоток у схему «зірка», діапазон 40–90 % – включенню за схемою «трикутник», а нульове значення означає повне відключення двигуна.

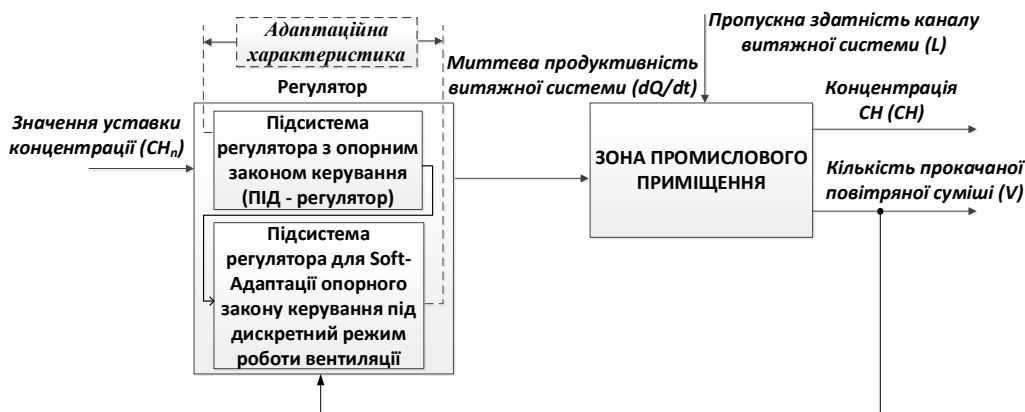


Рисунок 4 – Структурна схема контуру регулювання CH_4 з адаптаційною характеристикою

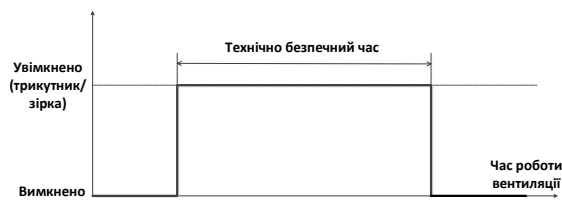


Рисунок 5 – Циклограма безпечної роботи вентиляції у дискретному режимі

Завдяки обмеженню кількості перемикачів та їхній прив'язці до визначених часових інтервалів значно зменшується навантаження на електромеханічні компоненти системи, що сприяє зниженню ризику виникнення аварійних ситуацій, підвищенню надійності роботи обладнання та зменшенню витрат на його технічне обслуговування.

Моделювання процесу керування вентиляцією у зоні промислового приміщення в середовищі MATLAB. Для моделювання процесу керування вентиляцією у вибраній зоні приміщення та подальшого аналізу основних динамічних параметрів у середовищі MATLAB була розроблена та реалізована імітаційна схема, представлена на рис. 6.

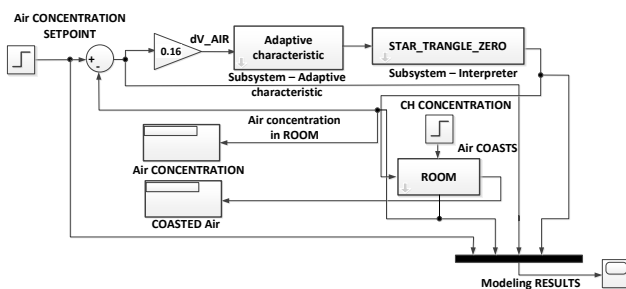


Рисунок 6 – Схема для моделювання процесу керування вентиляцією зони приміщення в середовищі MATLAB

Як видно з рисунка, створена модель містить три основні підсистеми: підсистему приміщення («ROOM»), яка імітує поведінку об'єкта керування, враховуючи інерційність процесу очищення повітря; підсистему адаптивної характеристики («Adaptive characteristic»), що формує необхідний регуляторний вплив на основі заданих параметрів адаптації; а також підсистему інтерпретації цієї характеристики у форматі трьохпозиційного керуючого сигналу («STAR_TRIANGLE_ZERO»), яка відповідає за вибір режиму роботи виконавчого механізму залежно від поточного стану системи. Така побудова моделі забезпечує цілісне відтворення логіки керування та дозволяє дослідити взаємодію підсистем в умовах змін навколишнього середовища.

Для візуалізації результатів моделювання та забезпечення зручного, наочного аналізу поведінки системи вентиляції в реальному часі, у середовищі MATLAB/Simulink використано спеціалізовані допоміжні блоки візуального контролю. Зокрема, реалізовано відображення динаміки зміни концентрації метану у повітрі за допомогою блоку «Air Concentration», що дає змогу в режимі реального часу оцінити ефективність процесу очищення повітря в

контрольованій зоні. Для контролю обсягу прокачаної повітряної суміші використано блок «COASTED AIR», який дозволяє визначити фактичну витрату повітря та її відповідність вимогам до енергоефективності системи. Крім того, ключовим елементом є блок «Modeling Results», який формує графіки перехідних процесів – таких як зміна концентрації газу, динаміка керуючого сигналу та перемикання режимів роботи вентиляційного приводу – що дозволяє наочно проаналізувати ефективність регулювання та виявити потенційні напрями для оптимізації алгоритмів керування.

Приклади отриманих результатів моделювання наведено на рис. 7, де відображено динаміку зміни концентрації повітряної суміші у приміщенні, відхилення керуючого сигналу та роботу інтерпретатора трьохпозиційного регулювання.

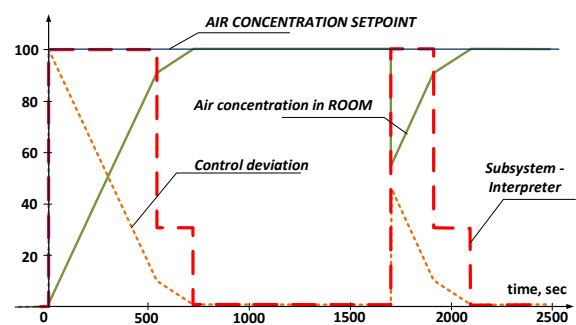


Рисунок 7 – Приклад перехідних процесів в системі при використанні у якості опорного алгоритму керування ПІД-регулятора з параметрами $P = 12$, $I = 12$, $D = 0.1$, $N = 200$ (інтерпретовано з адаптивної характеристики)

Беручи до уваги особливості, враховані під час формалізації приміщення як об'єкта керування, нижче наведено приклади реалізації відповідних підсистем, використаних у моделі для проведення комп'ютерного моделювання. На рис. 8 представлено приклад реалізації підсистеми формування адаптивної характеристики. Її побудова базується на послідовному порівнянні вхідного сигналу із заздалегідь визначеними пороговими значеннями, що задають межі чутливості системи. Кожен блок порівняння генерує відповідний бінарний сигнал, який відображає факт перевищення або недосягнення певного рівня вхідної величини. Далі бінарні сигнали підсумовуються і проходять етап масштабування для приведення отриманого результату до необхідного діапазону значень керуючого сигналу. Після цього результат надходить на комутаційний блок (Switch), який, виходячи з порівняння зі встановленим додатковим порогом, визначає, чи слід активувати виконавчий механізм у відповідному режимі. Такий підхід дозволяє реалізувати адаптивну реакцію системи на зміну вхідного сигналу з урахуванням визначеної порогової чутливості, забезпечуючи гнучкість налаштувань та підвищену стійкість роботи навіть за умов зовнішніх збурень або нестабільних процесів у робочому середовищі.

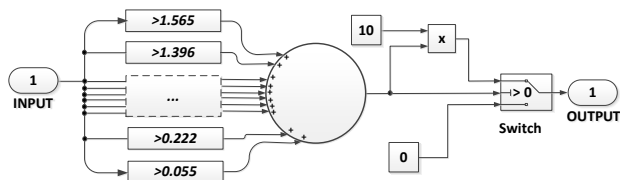


Рисунок 8 – Приклад реалізації підсистеми адаптивної характеристики («Adaptive characteristic»)

Подальше моделювання процесу вентиляції, як об'єкта керування, подано на рис. 9. У цій підсистемі реалізовано динамічну модель приміщення, яка враховує зміну концентрації метану в повітрі залежно від наявної витяжної потужності системи вентиляції. Модель включає інерційні властивості об'єкта, що дозволяє відобразити часові затримки у зміні концентрації газу при зміні умов вентиляції. Передбачено також можливість оцінки витрати повітря через вентиляційний канал та реакції концентрації у часі, що дає змогу не лише аналізувати миттєві стани системи, а й відтворювати реальні фізичні процеси очищення повітря в динаміці. Такий підхід до моделювання забезпечує адекватність отриманих результатів, дозволяє оцінювати ефективність різних стратегій керування і сприяє подальшій оптимізації режимів роботи вентиляційної системи для промислових приміщень із ризиком накопичення горючих газів.

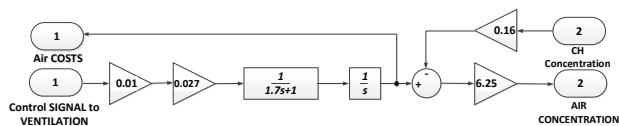


Рисунок 9 – Приклад реалізації підсистеми приміщення («ROOM»)

З метою узгодження вихідного сигналу адаптивної характеристики із дискретною логікою трьохпозиційного керування, реалізовано підсистему інтерпретації, яка представлена на рис. 10. Вона здійснює порогову обробку адаптивного сигналу, розділяючи його на три діапазони відповідно до режимів роботи електродвигуна: повне вимкнення, режим зниженої потужності та повне навантаження. Такий підхід дозволяє поєднати плавну логіку регулювання з апаратною реалізацією у вигляді трипозиційного виконавчого механізму.

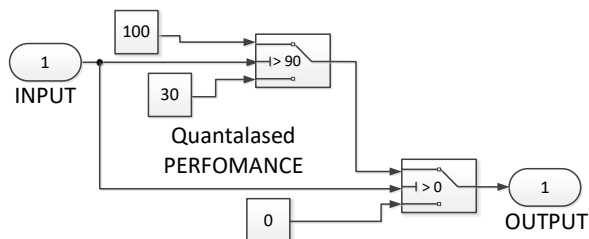


Рисунок 10 – Приклад реалізації підсистеми інтерпретації адаптивної характеристики в трьохпозиційний сигнал керування («STAR_TRIANGLE_ZERO»)

Основні висновки за результатами моделювання процесу керування концентрацією повітря у промисловому приміщенні в середовищі MATLAB. На основі моделі та методики, запропонованої у роботі [16] і адаптованої до задачі автоматизованого керування вентиляцією в приміщеннях енергетичних підприємств із ризиком накопичення вибухонебезпечних газів, було виконано серію аналітичних експериментів шляхом комп'ютерного моделювання в середовищі MATLAB Simulink. Представлені результати демонструють ключові принципи побудови системи витяжної вентиляції з урахуванням особливостей трьохпозиційного регулювання потужності асинхронного електроприводу, орієнтованого на стабілізацію концентрації метану у повітряній суміші. Для випадку контролю водню в акумуляторних залах розрахункова схема та алгоритм залишаються аналогічними.

Аналіз практичних результатів показав, що використання ПІ або ПІД-закону регулювання у системах вентиляції з дискретним режимом роботи забезпечує стійкий і швидкий перехідний процес за концентрацією газу у повітряній суміші без порушення нормативних вимог. Параметри якості переходу, отримані в ході моделювання, продемонстрували відповідність загальноприйнятим технічним критеріям: статична похибка залишалася менше 1 %, а коливальні явища були відсутні, що наближало динаміку поведінки системи до аперіодичної ланки другого порядку.

Крім того, результати моделювання засвідчили, що мінімізація енергетичних витрат на прокачування повітряної суміші без погіршення якості регулювання і стійкості системи можлива шляхом застосування пропорційно-інтегрального або пропорційно-інтегрально-диференційного закону регулювання з мінімальним впливом диференційної складової, який становить лише долі відсотка від інтегральної складової.

Окрему увагу приділено оцінці ефективності адаптаційної характеристики, яка була використана для трансформації класичного регулятора у дискретну форму. Отримані результати підтвердили, що побудова адаптаційної характеристики значно спрощує реалізацію регулювання на виконавчих пристроях типу «On/Off» з подальшим переходом до трьохпозиційної логіки.

Подальший аналіз підтвердив також ефективність застосування серверної архітектури типу «сервер – виконавчий пристрій зі зворотним зв'язком через спільну інформаційно-керуючу мережу», що дозволяє оптимізувати процес налаштування, моніторингу та передачі даних у системі за умови використання надійних промислових протоколів обміну.

Висновки. Проведення дослідження дозволяє зробити ряд аналітичних та практичних висновків, які мають значення для розробки, впровадження і налаштування аналогічних систем та підсистем автоматичного регулювання.

Організація системи керування на основі спільної локальної інформаційно-керуючої мережі з використанням надійних інтерфейсів і стандартних протоколів значно спрощує архітектуру системи без втрати її функціональності та підвищує гнучкість її масштабування і резервування. Спрощення фізичної інфраструктури, у тому числі трасувань і підсистем живлення, забезпечує додаткові економічні переваги на етапах проектування і впровадження.

Інтеграція доступних елементів, таких як стандартні датчики, мікроконтролери та відкриті середовища розробки, сприяє істотному зниженню вартості створення, розгортання і подальшого обслуговування системи, що робить її економічно привабливою для впровадження у промислових умовах. Використання компонентів із відкритими специфікаціями також забезпечує більшу гнучкість у процесі модернізації та масштабування системи під конкретні вимоги об'єкта. Включення IoT-технологій і технологій промислового інтернету речей (IIoT) додатково спрощує інтеграцію системи у глобальні інформаційні екосистеми, забезпечуючи можливість її віддаленого моніторингу, керування та оперативного налаштування. Завдяки такому підходу відкриваються нові можливості застосування туманних (fog computing) та хмарних обчислень (cloud computing) для обробки даних і підвищення загальної якості процесів керування, що є особливо важливим для об'єктів із високими вимогами до надійності, безпеки та енергоефективності.

Використання web-технологій для налаштування, адміністрування та моніторингу сприяє підвищенню ефективності експлуатації системи на базі mesh-мереж. Мультипротокольна підтримка при грамотному проектуванні дозволяє синергетично поєднувати різні канали обміну даними для підвищення надійності і продуктивності керуючих процесів.

Особливу увагу слід приділяти вибору апаратної основи для IoT- і IIoT-систем — застосування мікроконтролерів сімейства ESP виробництва Espressif Systems дозволяє суттєво знизити витрати та спростити як розгортання, так і подальшу підтримку системи.

У цілому результати проведеного дослідження підтверджують ефективність запропонованої методики побудови дискретних систем керування вентиляційними процесами на основі адаптаційної характеристики, зокрема для задач контролю концентрації вибухонебезпечних газів — таких як метан у приміщеннях із газогенераторами та водень в акумуляторних залах. Також обґрунтовано доцільність впровадження гнучкої та масштабованої архітектури керування з використанням сучасних інформаційних технологій і IoT-пристроїв, що забезпечують інтеграцію системи в локальні мережі керування та моніторингу.

Список літератури

1. Design of monitoring and control system for indoor flammable gas / R. Zhao et al. 2018 6th International Conference on Machinery, Materials and Computing Technology (ICMMCT 2018), Jinan, China,

- 2–3 June 2018. Paris, France, 2018. DOI: <https://doi.org/10.2991/icmmct-18.2018.15>.
2. Development and assessment of an indoor air quality control IoT-based system / G. Guerrero-Ulloa et al. *Electronics*. 2023. Vol. 12, no. 3. 608. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics12030608>.
3. Li J., Wall J., Platt G. Indoor air quality control of HVAC system. *Proceedings of the 2010 International Conference on Modelling, Identification and Control*, Okayama, Japan. P. 756–761.
4. Mukesh D. M., Akula S. K. Automated indoor air quality monitor and control. *International Journal of Computer Applications*. 2017. Vol. 159, no. 6. P. 33–38. DOI: <https://doi.org/10.5120/ijca2017912968>.
5. Saini J., Dutta M., Marques G. Indoor air quality monitoring systems based on internet of things: a systematic review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2020. Vol. 17, no. 14. 4942. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph17144942>.
6. Biswal A., Subhashini J., Pasayat A. K. Air quality monitoring system for indoor environments using IoT. *The 11th National Conference on Mathematical Techniques and Applications*, Chennai, India, 11–12 January 2019. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5112365>.
7. IoT based indoor air quality monitoring system using Raspberry Pi4 / S. Faiazuddin et al. 2020 4th International Conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology (ICECA), Coimbatore, 5–7 November 2020. P. 714–719. DOI: <https://doi.org/10.1109/iceca49313.2020.9297442>.
8. IOT based – automated indoor air quality and LPG leak detection control system using support vector machine / P. R. Meris et al. 2020 11th IEEE Control and System Graduate Research Colloquium (ICSGRC), Shah Alam, Malaysia, 8 August 2020. P. 231–235. DOI: <https://doi.org/10.1109/icsgrc49013.2020.9232472>.
9. Nicholas D., Ackley R., Phillips N. G. A simple method to measure methane emissions from indoor gas leaks. *PLOS ONE*. 2023. Vol. 18, no. 11. e0295055. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0295055>.
10. A portable device for methane measurement using a low-cost semiconductor sensor: development, calibration and environmental applications / L. Furst et al. *Sensors*. 2021. Vol. 21, no. 22. 7456. DOI: <https://doi.org/10.3390/s21227456>.
11. Bushnag A. Air quality and climate control arduino monitoring system using fuzzy logic for indoor environments. 2020 International Conference on Control, Automation and Diagnosis (ICCAD), Paris, France, 7–9 October 2020. DOI: <https://doi.org/10.1109/iccad49821.2020.9260514>.
12. Merrin Z., Francisco P. W. Unburned methane emissions from residential natural gas appliances. *Environmental Science & Technology*. 2019. Vol. 53, no. 9. P. 5473–5482. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b05323>.
13. Бондаренко М. О., Гурін М. П., Ніконова З. А. Розробка дистанційного аналізатора повітря. *The 11th International scientific and practical conference "Modern research in world science"*, Lviv, Ukraine, 29–31 January 2023. P. 347–351. URL: <https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2023/02/MODERN-RESEARCH-IN-WORLD-SCIENCE-29-31.01.23.pdf>.
14. Design and evaluation of a low-cost sensor node for near-background methane measurement / D. Furuta et al. *Atmospheric Measurement Techniques*. 2024. Vol. 17, no. 7. P. 2103–2121. DOI: <https://doi.org/10.5194/amt-17-2103-2024>.
15. Karamchandani S., Gonsalves A., Gupta D. Pervasive monitoring of carbon monoxide and methane using air quality prediction. 2016 3rd International Conference on Computing for Sustainable Global Development (INDIACom), New Delhi, India, 16–18 March 2016. P. 2498–2502.
16. Програмна адаптація опорного алгоритму для дискретного регулювання / В. С. Ноздренков та ін. *Проблеми інформатизації та управління*. 2024. Т. 2, № 78. С. 52–60. DOI: <https://doi.org/10.18372/2073-4751.78.18961>.

References (transliterated)

1. R. Zhao, L. Ma, H. Wei, and G. Pang, "Design of monitoring and control system for indoor flammable gas", in *2018 6th International Conference on Machinery, Materials and Computing Technology (ICMMCT 2018)*, Jinan, China, Jun. 2–3, 2018. Paris, France: Atlantis Press, 2018, doi: <https://doi.org/10.2991/icmmct-18.2018.15>
2. G. Guerrero-Ulloa, A. Andrago-Catota, M. Abad-Alay, M. J. Hornos, and C. Rodríguez-Domínguez, "Development and

- assessment of an indoor air quality control IoT-based system”, *Electronics*, vol. 12, no. 3, Jan. 2023, Art. no. 608, doi: <https://doi.org/10.3390/electronics12030608>
3. J. Li, J. Wall, and G. Platt, “Indoor air quality control of HVAC system”, in *Proceedings of the 2010 International Conference on Modelling, Identification and Control*, Okayama, Japan, Japan. n.d., pp. 756–761.
 4. D. M. Mukesh and S. K. Akula, “Automated indoor air quality monitor and control”, *International Journal of Computer Applications*, vol. 159, no. 6, pp. 33–38, Feb. 2017, doi: <https://doi.org/10.5120/ijca2017912968>
 5. J. Saini, M. Dutta, and G. Marques, “Indoor air quality monitoring systems based on internet of things: A systematic review”, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 17, no. 14, Jul. 2020, Art. no. 4942, doi: <https://doi.org/10.3390/ijerph17144942>
 6. A. Biswal, J. Subhashini, and A. K. Pasayat, “Air quality monitoring system for indoor environments using IoT”, in *The 11th National Conference on Mathematical Techniques and Applications*, Chennai, India, Jan. 11–12, 2019. AIP Publ., 2019, doi: <https://doi.org/10.1063/1.5112365>
 7. S. Faiazuddin, M. V. Lakshmaiah, K. T. Alam, and M. Ravikiran, “IoT based indoor air quality monitoring system using Raspberry Pi4”, in *2020 4th International Conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology (ICECA)*, Coimbatore, Nov. 5–7, 2020, pp. 714–719, doi: <https://doi.org/10.1109/iceca49313.2020.9297442>
 8. P. R. Meris *et al.*, “IoT based – automated indoor air quality and LPG leak detection control system using support vector machine”, in *2020 11th IEEE Control and System Graduate Research Colloquium (ICSGRC)*, Shah Alam, Malaysia, Aug. 8, 2020, pp. 231–235, doi: <https://doi.org/10.1109/icsgrc49013.2020.9232472>
 9. D. Nicholas, R. Ackley, and N. G. Phillips, “A simple method to measure methane emissions from indoor gas leaks”, *PLOS ONE*, vol. 18, no. 11, Nov. 2023, Art. no. e0295055, doi: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0295055>
 10. L. Furst, M. Feliciano, L. Frare, and G. Igrejas, “A portable device for methane measurement using a low-cost semiconductor sensor: Development, calibration and environmental applications”, *Sensors*, vol. 21, no. 22, Nov. 2021, Art. no. 7456, doi: <https://doi.org/10.3390/s21227456>
 11. A. Bushnag, “Air quality and climate control arduino monitoring system using fuzzy logic for indoor environments”, in *2020 International Conference on Control, Automation and Diagnosis (ICCAD)*, Paris, France, Oct. 7–9, 2020, doi: <https://doi.org/10.1109/iccad49821.2020.9260514>
 12. Z. Merrin and P. W. Francisco, “Unburned methane emissions from residential natural gas appliances”, *Environmental Science & Technology*, vol. 53, no. 9, pp. 5473–5482, Mar. 2019, doi: <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b05323>
 13. M. O. Bondarenko, M. R. Hurin, and Z. A. Nikonova, “Rozrobka dystantsiinoho analizatora povitria [Development of a remote air analyser]”, in *The 11th International Scientific and Practical Conference “Modern Research in World Science”*, Lviv, Ukraine, Jan. 29–31, 2023, pp. 347–351, doi: <https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2023/02/MODERN-RESEARCH-IN-WORLD-SCIENCE-29-31.01.23.pdf> (in Ukrainian)
 14. D. Furuta, B. Wilson, A. A. Presto, and J. Li, “Design and evaluation of a low-cost sensor node for near-background methane measurement”, *Atmospheric Measurement Techniques*, vol. 17, no. 7, pp. 2103–2121, Apr. 2024, doi: <https://doi.org/10.5194/amt-17-2103-2024>
 15. S. Karamchandani, A. Gonsalves, and D. Gupta, “Pervasive monitoring of carbon monoxide and methane using air quality prediction”, in *2016 3rd International Conference on Computing for Sustainable Global Development (INDIACom)*, New Delhi, India, Mar. 16–18, 2016, pp. 2498–2502.
 16. V. S. Nozdrenkov, A. V. Pavlov, G. A. Oleksienko, O. Y. Zhuravlov, and Y. O. Zhuravlov, “Soft-adaptation of reference algorithm for discrete control”, *Problems of Informatization and Management*, vol. 2, no. 78, pp. 52–60, Jul. 2024, doi: <https://doi.org/10.18372/2073-4751.78.18961> (in Ukrainian)

Надійшла (received) 12.05.2025

UDC 681.518:004.942

NOZDRENKOV VALERII ✉ – Candidate of Technical Sciences (PhD), Docent, Postdoctoral Researcher at the Department of Computer Science and Systems Analysis, Cherkasy State Technological University; Cherkasy, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-0579-6821>; e-mail: v.s.nozdrenkov.d24@chdtu.edu.ua.

PAVLOV ANDRII – Candidate of Physical and Mathematical Sciences (PhD), Docent, Associate Professor of the Department of Computerized Control Systems; Sumy State University; Sumy, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-8861-8472>; e-mail: a.pavlov@ksu.sumdu.edu.ua.

OLEKSIENKO GALYNA – Candidate of Physical and Mathematical Sciences (PhD), Docent, Associate Professor of the Department of Computer Science; Sumy State University; Sumy, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0274-5095>; e-mail: galyana2@ukr.net.

ZHURAVLOV OLEKSANDR – Candidate of Technical Sciences (PhD), Docent, Senior Lecturer of the Department of Computerized Control Systems; Sumy State University; Sumy, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-7834-6661>; e-mail: san.75@i.ua.

KORENEV MYKOLA – Software Engineer, “NETCRACKER LLC”; Sumy, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-6929-7281>; e-mail: nikolaj.korenev99@gmail.com.

ADAPTIVE THREE-POSITION CONTROL OF VENTILATION IN POWER FACILITY PREMISES WITH THE RISK OF ACCUMULATING EXPLOSIVE GASES

The article presents a methodology for three-position discrete control of ventilation systems in the premises of energy enterprises with an increased risk of forming explosive gas environments. The focus is on two typical sources of hazardous gas accumulation: methane, released in rooms with gas-fueled power generator units, and hydrogen, generated while charging lead-acid batteries in accumulator rooms. The proposed approach enables the transition from two-position (“On-Off”) control to a three-position ventilation drive control mode using an adaptive characteristic derived from a PID controller with predefined parameters. The control is implemented through an asynchronous electric motor with a “star–delta–off” switching scheme, allowing the exhaust ventilation operation mode to adjust automatically. The automation of the system is based on an IoT device that supports integration into a local information-control network, measures temperature and flame presence, and transmits data via the industrial ModBus TCP protocol. System operation modelling was performed in MATLAB Simulink, including implementing the adaptive characteristic subsystem, its conversion into a three-position control signal, and a dynamic model of ventilation behaviour under varying gas concentrations. The results confirm the stable operation of the ventilation system, effective reduction in methane and hydrogen concentrations, and decreased energy consumption through optimized fan control. The proposed methodology allows classical control algorithms to be adapted for discrete actuator operation and enables seamless integration of ventilation subsystems into modern automated energy infrastructure.

Keywords: three-position discrete control; ventilation system; explosive gases; methane; hydrogen; gas generators; battery rooms; PID controller; Internet of Things (IoT); automation; MATLAB Simulink; ModBus TCP; energy efficiency; energy facilities.

ОМЕЛЯНЕНКО ГАЛИНА ВІКТОРІВНА – кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри передачі електричної енергії, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3276-5476>; e-mail: omeljanenkhalina@gmail.com.

ЧЕРКАШИНА ВЕРОНІКА ВІКТОРІВНА – доктор технічних наук, доцент, професор кафедри передачі електричної енергії, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5639-9722>; e-mail: veronika2473@gmail.com.

МАКАРОВ АНТОН ОЛЕКСАНДРОВИЧ ✉ – аспірант кафедри передачі електричної енергії, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-6181-3822>; e-mail: ant.makarov1997@gmail.com.

ДОСЛІДЖЕННЯ ДОЦІЛЬНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ НАКОПИЧУВАЧІВ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ УКРАЇНИ

Проведено дослідження, яке дозволило обґрунтувати доцільне застосування накопичувачів електричної енергії в електричних мережах України. Актуальність цього дослідження обумовлено впровадженням в електричні мережі України відновлювальних джерел енергії, що сприяє необхідності в акумулюванні електричної енергії. Для знаходження шляхів реалізації цієї проблеми виконано аналіз маховикових, надпровідникових індуктивних накопичувачів електричної енергії, акумуляторів великої потужності та суперконденсаторів. Розглянуто їх особливості роботи, переваги та недоліки. З аналізу переваг, недоліків та особливостей роботи накопичувачів електричної енергії слідує, що доцільно визначити оптимальну сферу застосування для кожного з них та виявити їх відповідність існуючій в електричних мережах проблемі. Проведений аналіз дозволив це зробити і обґрунтувати оптимальну сферу застосування кожного виду накопичувача, а також виявити їх відповідність віршувальній в електричних мережах проблемі. Для підвищення енергоефективності мережі за рахунок оптимізації процесів виробництва і споживання електроенергії розроблені схеми підключення накопичувачів електричної енергії, а саме схема, яка враховує категорії надійності споживачів та схема, яка враховує наявність в мережах відновлювальних джерел енергії. Запропоновані схеми підключення накопичувачів електричної енергії дозволяють відмовитися від великих резервних генеруючих електростанцій при збереженні режимної надійності мережі. Для застосування доцільного виду накопичувача електричної енергії під час вирішення тієї чи іншої проблеми сформовано структурну модель відповідності виду накопичувача вирішуваній проблемі. Застосування сформованої структурної моделі дозволить покращити показники якості електричної енергії, режимної надійності мережі та енергоефективності електричної системи в цілому.

Ключові слова: відновлювальні джерела енергії; електрична енергія; електрична мережа; енергоефективність; надійність; накопичувач енергії; якість електричної енергії.

Вступ. Впровадження в електричні мережі (ЕМ) України відновлювальних джерел енергії (ВДЕ) обумовлює необхідність в акумулюванні електричної енергії. Одним із напрямків вирішення цього питання є впровадження в ЕМ накопичувачів електричної енергії (НЕЕ). Завданням НЕЕ являється вирівнювання навантаження в ЕМ в періоди максимального та мінімального споживання електричної енергії (ЕЕ).

НЕЕ впливають на функціонування ЕМ. Вони накопичують ЕЕ в періоди мінімального споживання, а відпускають її під час максимального споживання. Тобто, вони мають здатність розділяти у часі виробництво і споживання ЕЕ, що покращує режимну надійність ЕМ і обумовлює один із перспективних напрямів розвитку ЕМ України. Системи накопичення енергії є особливо необхідними для інтеграції об'єктів «зеленої» енергетики в енергосистему України, оскільки сприяють надійності виконання планового графіку видачі потужності в ЕМ [1].

Постановка проблеми. В ЕМ України для зберігання електричної існують гідроакумулюючі електростанції (ГАЕС), які впроваджені ще під час масової електрифікації в 60–70 роках минулого століття. Але, на сьогодні технології накопичення електричної енергії вийшли на новий рівень. НЕЕ створюються на основі передових технологій системи накопичення електричної енергії. Їх застосування в ЕМ

України дозволить покращити керування сталими та перехідними режимами роботи ЕМ, що позитивно відобразиться на показниках якості електричної енергії і підвищить режимну надійність і енергоефективність ЕМ.

Також, слід звернути увагу, що на сьогодні в Об'єднаній енергосистемі України існує значний дефіцит маневреної потужності, який виник в результаті воєнної агресії російської федерації і єдиний тип накопичувачів енергії, що використовується в ній, це ГАЕС, ємності яких недостатньо для забезпечення її стійкості.

У 2020 р. в місті Енергодар, на території Запорізької ТЕС, компанія ДТЕК запустила першу в Україні промислову літій-іонну систему накопичення енергії потужністю 1 МВт і ємністю 2,25 МВт·г. Цей проєкт дозволяє знайти оптимальну модель роботи систем НЕЕ відповідно до сфер енергоринку держави [2]. Але, на жаль, місто Енергодар знаходиться під окупацією російської федерації, тому оцінювати цей проєкт на сьогодні неможливо.

Таким чином, питання доцільності впровадження НЕЕ в ЕМ України являються актуальними і потребують додаткових досліджень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В останній період значно зросла індустрія накопичення енергії. Середньорічні темпи зростання склали близько



47%. За даними Clean Horizon Consulting, у 2020 році в Європі за масштабами систем НЕЕ лідирували [3]:

- Великобританія — з об'ємом 850 МВт встановленої потужності і 1894 МВт анонсованої потужності;
- Німеччина — 428 МВт і 109 МВт встановленої і анонсованої потужності відповідно;
- Франція — 137 МВт і 248 МВт встановленої і анонсованої потужності відповідно.

За прогнозами Bloomberg NEF, до 2030 року світовий ринок накопичення енергії зростатиме щорічно на 21 % до 137 ГВт/442 ГВт·год і 2040 року потужності систем накопичення енергії у світі перевищать 1 ТВт [4].

Використання накопичувачів енергії дозволяє відмовитися від великих резервних генеруючих електростанцій за умови збереження надійності ЕМ та може призвести до зниження вартості ЕЕ. В період з 1997 р. по 2017 р. встановлена потужність систем зберігання енергії у світі збільшилася на 70 % і досягла 170 ГВт [5]. Спеціалісти Міжнародного агентства з відновлюваної енергетики вважають, що основними драйверами подальшого зростання потужності накопичувачів енергії є широке впровадження вітрових та сонячних електростанцій [5]. Порівнюючи з 2017 р. потужності НЕЕ в залежності від темпів зростання ВДЕ зростуть у 2030 р. на 42–68 % [5].

Це питання досліджується багатьма українськими вченими, що знайшло своє відображення в наукових працях, серед яких [6–8]. В публікаціях цих та інших науковців України акцентовано увагу, що впровадження НЕЕ дозволить створювати розгалужену мережу систем накопичення, яка зможе максимально швидко і ефективно адаптуватись до змін в ЕМ, за рахунок вирівнювання генерації та споживання, але це збільшує загальну економічну ефективність проекту з використанням НЕЕ.

Мета статті. Дослідити доцільність застосування накопичувачів електричної енергії в електричних мережах України для розроблення структурної моделі відповідності виду накопичувача вирішуваним в мережі проблемі, що дозволить покращити показники якості електричної енергії і режимну надійність та енергоефективність мережі за рахунок оптимізації процесів виробництва і споживання електроенергії.

Аналіз основних видів накопичувачів електричної енергії та їх особливостей. До основних видів накопичувачів електричної енергії, що випускаються промисловістю, належать: маховики (кінетичні); суперконденсатори, надпровідникові індуктивні накопичувачі (НПНЕ), акумуляторні батареї великої потужності. [9].

Маховикові НЕЕ. Принцип дії маховикового НЕЕ заснований на перетворенні кінетичної енергії в електричну та в зворотньому напрямку.

Конструкція маховикового накопичувача складається з:

- приводу (асинхронні машини, реактивні електричні машини чи машини з постійними магнітами на роторі);

- маховика (виготовляється зі сталі або композитних матеріалів (скловолокно, карбон)), поміщений у вакуумований кожух;
- опорних підшипників (механічні, магнітні чи змішані).

Принцип роботи накопичувача:

- в режимі заряджання електроенергія подається до статорної обмотки через двонаправлений інвертор, що спричиняє зростання обертового моменту і, відповідно, підвищення швидкості обертання маховика.

- в режимі розряджання обертова кінетична енергія створює гальмівний (генераторний) момент на валу, внаслідок чого в обмотці статора виникає електрична напруга. Ця напруга за допомогою інвертора перетворюється на змінний струм із потрібними характеристиками.

Для зменшення втрат через тертя в корпусі накопичувача створюється вакуум, в якості підшипників використовується магнітне поле (працює без тертя). Розрізняють два типи маховикових НЕЕ: високошвидкісні та низькошвидкісні.

До основних переваг маховикових НЕЕ відносяться:

- висока надійність та ефективність;
- великий термін експлуатації (15–20 років);
- високий ККД (90–95 %);
- швидкість та велика кількість циклів «заряд-розряд» (від 10 000 до 100 000);
- щодо низька вартість;
- екологічність.

Недоліки:

- високі втрати на холостому ходу;
- необхідність технічного обслуговування магнітних підшипників;
- вірогідність відмови під впливом зовнішніх факторів.

До недоліків можна зарахувати відносно високі постійні втрати [8].

Суперконденсатори. Суперконденсатори – це вдосконалені конденсатори, які працюють на постійній напрузі, що мають високу щільність заряду завдяки подвійному електричному шару на межі розділу електрода та електроліту. Велика ємність суперконденсаторів, яка сягає кількох фарад, дозволяє накопичувати значну енергію, яка віддається у потрібний момент як великих струмів. Суперконденсатори відносяться до накопичувачів короткого часу, вони компактні, прості та мають набагато більший термін служби, ніж у звичайних конденсаторів.

До основних переваг суперконденсаторів відносяться:

- дуже висока густина ємності;
- великий термін експлуатації;
- високий ККД (95 % та вище);
- висока питома енергія та питома потужність;
- безперебійна експлуатація;
- висока швидкість заряду та розряду

- низька токсичність матеріалів.

Вони можуть працювати в широкому діапазоні температур (від -40°C до $+65^{\circ}\text{C}$) [8].

До недоліків можна віднести відносно низьку питому енергоємність, високий саморозряд, низьку напругу комірки, високу вартість.

Надпровідникові індуктивні НЕЕ (НПІНЕЕ).

НПІНЕЕ це спеціальний термос для зберігання холодних рідин, ізолюючий обмотки котушки, що знаходиться всередині, від притоку тепла зовні; із нержавіючої сталі.

До основних переваг НПННЕЕ відносяться:

- висока щільність енергії, що запасється (до 400 МДж/см³);
- постійна готовність до роботи з часом реакції 1–2 мс;
- необмежений час зберігання енергії;
- відсутність перетворення одного виду енергії на інший;

- високий ККД (до 97 %)
- висока надійність.

До недоліків відносяться:

- дуже висока вартість;
- небезпека викиду рідкого азоту та гелію у навколишнє середовище при аварійній втраті надпровідності.

Акумулятори великої потужності (АВ). АВ – це два або більше акумуляторів (елементів), з'єднаних між собою та використовуваних як джерело електричної енергії. У процесі заряду АВ електроенергія електрохімічним шляхом перетворюється на хімічну. При розряді накопичена енергія вивільняється у процесі зворотної реакції. Найбільш поширеними є свинцево-кислотні, нікель-кадмієві та літій-іонні види батарей.

До основних переваг АБ належать:

- низька вартість свинцево-кислотних акумуляторів;
- висока енергоємність нікель-кадмієвих та літій-іонних акумуляторів;
- швидке введення в роботу;
- Висока надійність.

До недоліків відносяться:

- мала енергоємність, низька кількість циклів заряду/розряду у свинцево-кислотних акумуляторів;

- «ефект пам'яті» – різке падіння енергоємності при неповному розряді або заряді у нікель-кадмієвих акумуляторів;

- низький порівняно з іншими типами накопичувачів енергії ККД (65–70 %);

- обмежена кількість зарядно-розрядних циклів (не більше 500);

- малий час зберігання енергії;
- негативний екологічний вплив під час утилізації.

Розроблення схеми підключення накопичувача електричної енергії. Після виявлення відповідності виду НЕЕ вирішуваній проблемі, що забезпечує найбільший ефект, необхідно визначати принципову схему включення НЕЕ в мережу, тип та характеристики НЕЕ, виходячи з особливостей завдання.

При провалах та тимчасових перевищеннях напруги необхідно визначити потужність перешкоди та за її величиною вибрати необхідну потужність НEE. Найбільш ефективним видом НEE для скорочення тривалості та величини провалів та тимчасових перевищеннях напруги є суперконденсатори.

Застосування суперконденсаторів дозволяє скорочувати тривалість провалів та тимчасових перевищень більш ніж на 50 %, а величину провалів та тимчасових перевищень – до 10 %. Місце кращого включення суперконденсаторів – клема приводів високовольтних вимикачів або вторинні збирання розподілу електроенергії між приводами.

Принципова схема використання НЕЕ для безперебійного електропостачання споживачів наведена рис 1.

Для кожного конкретного випадку потужність НЕЕ (рис. 1) визначається як різниця між номінальною потужністю джерел генерації і потужністю, необхідною споживачам під час відключення основного джерела енергії. Якщо потужності НЕЕ буде достатньо, він може забезпечити живлення всіх споживачів. Якщо потужності буде недостатньо, автоматичне частотне регулювання відключить III категорію, за необхідності II категорію, і НЕЕ забезпечуватиме живлення споживачів I категорії.

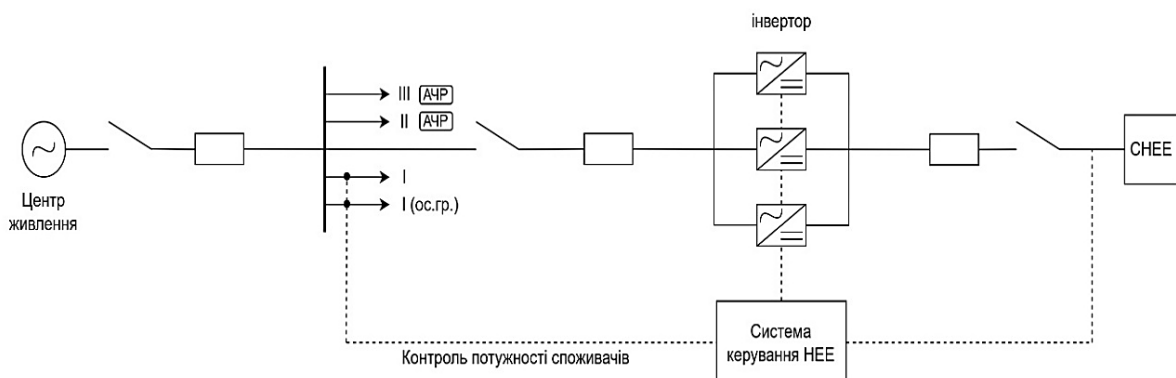


Рисунок 1 – Схема підключення НЕЕ

За таких умов слід зауважити, що основним завданням НЕЕ являється забезпечення балансу потужності електростанцій на ВДЕ та навантаження. Використання НЕЕ дозволяє відмовитися від великих резервних генеруючих електростанцій при збереженні надійності ЕМ та може призвести до зниження вартості електроенергії.

Спеціалісти Міжнародного агентства з відновлюваної енергетики вважають, що основними драйверами подальшого зростання потужності накопичувачів енергії є широке впровадження вітрових та сонячних електростанцій [5]. При цьому глобальні потужності накопичувачів в залежності від темпів зростання відновлюваних джерел енергії згідно з прогнозами зростуть у 2030 р. в порівнянні з 2017 р. на 42–68 % (при помірному зростанні) та на 155–227 % (при швидкому) [5].

Схема підключення НЕЕ до ЕМ з ВДЕ представлено на рис 2.

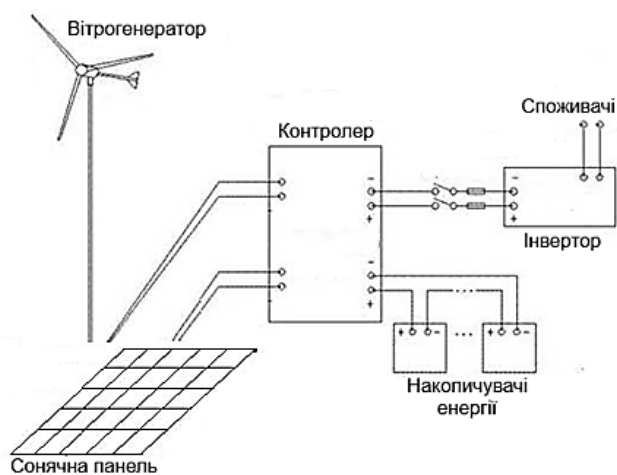


Рисунок 2 – Підключення накопичувачів електроенергії до ЕМ з ВДЕ

При використанні НЕЕ спільно з ВДЕ, встановлена потужність НЕЕ повинна бути розрахована як різниця між встановленою потужністю, що генерується ВДЕ та мінімальною потужністю навантаження [10].

Формування структурної моделі відповідності виду накопичувача вирішуваній проблемі в ЕМ. Застосування НЕЕ дозволяє ефективно вирішувати низку проблем, таких як провали та тимчасові перевищення напруги, нерівномірність графіків електричних навантажень, у тому числі коливання навантаження, відхилення частоти, низька надійність електропостачання.

Проаналізуємо ці проблеми детальніше для формування структурної моделі.

Провал напруги – це тимчасове зменшення напруги в конкретній точці електричної системи нижче встановленого порогового значення та економічні збитки.

Причинами провалів напруги можуть бути: пускові струми при старті потужних електродвигунів та

генераторів, короткі замикання в електричній мережі, раптові наचерки навантаження, комутації мережного обладнання, кліматичні дії.

Тимчасове перевищення напруги – динамічне короткочасне (не менше 0,01 с) відхилення напруги з подальшим поверненням до вихідного значення.

Серед можливих наслідків коливань напруги – мерехтіння освітлення, зношування контактів та ізоляції, пошкодження приладів. Причинами тимчасових перевищень напруги може бути різке зміна навантаження, пошкодження електричних мереж, процеси комутації та інших.

Нерівномірність графіків навантаження ЕМ обумовлена технологічними процесами промислових підприємств, зростанням побутового навантаження в ранкові та вечірні години та значним спадом у денний та нічний час. Нерівномірність графіків навантажень призводить до низки негативних наслідків, у тому числі найбільш виражені: зниження надійності електропостачання, різке підвищення навантаження на генеруючі установки, скорочення термінів експлуатації устаткування й збільшення експлуатаційних витрат.

Відхилення значення основної частоти напруги електроживлення від номінального значення в межах, встановлених ДСТУ EN 50160:2023, виникає при дефіциті потужності, що генерується, або її надлишку [11]. У разі неприпустимих відхилень частоти страждають, передусім, електродвигуни. При зниженні частоти відбувається уповільнення ротора двигуна, що веде до зниження ефективності його роботи, при збільшенні частоти - до перегріву та підвищеного зношування через збільшення швидкості обертання, що значно знижує термін служби двигунів.

Зазначені проблеми можна вирішувати не лише традиційними способами, а й за допомогою НЕЕ, що дозволить суттєво підвищити режимну надійність та енергоефективність ЕМ.

На рис. 3 представлено сформовану структурну модель відповідності виду накопичувача вирішуваній проблемі в ЕМ.

Застосування цієї моделі не суперечить Енергетичної стратегії України на період до 2050 року, ключовими принципами якої є економічна обґрунтованість, екологічність, доступність, соціальна справедливість та ринковість [12].

Місією Енергетичної стратегії України до 2050 року [12] є створення умов для сталого розвитку національної економіки через забезпечення доступу до надійних, стійких і сучасних джерел енергії.

Відповідно до [12] енергетичний сектор України має бути максимально наближений до кліматичної нейтральності. Це означатиме наявність чистої енергії, подолання енергетичної бідності, розвиток інноваційної та децентралізованої енергосистеми, повноцінне функціонування національних енергетичних ринків і їх інтеграцію в міжнародні.

Таким чином, спираючись на рис. 3, під час виникнення тієї чи іншої проблеми існують НЕЕ, які дозволяють її енергоефективно вирішення.

4. Nsitem N. Global energy storage market records biggest jump yet. *BloombergNEF*. URL: <https://about.bnef.com/insights/clean-energy/global-energy-storage-market-records-biggest-jump-yet/>.
5. International Renewable Energy Agency. *Electricity Storage and Renewables: Costs and Markets to 2030*. Abu Dhabi, 2017. 131 p. URL: <https://www.irena.org/Publications/2017/Oct/Electricity-storage-and-renewables-costs-and-markets>.
6. Малогулко Ю. В., Ластівка В. Б. Дослідження сучасних технологій систем накопичення енергії. *Znanstvena misel journal*. 2022. № 65. С. 65–68.
7. Болотний М. П., Лоєнко Ю. Г., Кармазін О. О. Застосування систем накопичення енергії для задач керування режимами ЕЕС України: стан та перспективи розвитку. *Відновлювальна енергетика*. 2023. № 3(70). С. 28–35. DOI: [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2022.3\(70\).28-35](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2022.3(70).28-35).
8. Дерій В. Накопичувачі електричної енергії. *Системні дослідження в енергетиці*. 2023. № 1(72). С. 12–24. DOI: <https://doi.org/10.15407/srenergy2023.01.012>.
9. Сінчук І. О., Бойко С. М. Системи накопичення електричної енергії: підручник. Кривий Ріг, 2020. 219 с.
10. Кузнецов М. П. Особливості комбінованих енергосистем з відновлюваними джерелами енергії: монографія. Київ: IBE, 2022. 142 с.
11. ДСТУ EN 50160:2023. Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності. Чинний від 2023-12-08. Вид. офіц.
12. Про схвалення Енергетичної стратегії України на період до 2050 року: Розпорядження Кабінету Міністрів України від 21.04.2023 № 373-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/373-2023-p#Text>.
3. A. Poliak. “Systemy nakopychennia enerhii: Chy ye maibutnie v Ukraini?” [Energy storage systems: Do they have a future in Ukraine?]. *EcoPolitic*. [Online]. Available: <https://ecopolitic.com.ua/ua/news/sistemi-nakopychennya-enerhii-chi-ye-maibutnie-v-ukraini/> (in Ukrainian)
4. N. Nsitem. “Global energy storage market records biggest jump yet.” *BloombergNEF*. [Online]. Available: <https://about.bnef.com/insights/clean-energy/global-energy-storage-market-records-biggest-jump-yet/>
5. International Renewable Energy Agency, *Electricity Storage and Renewables: Costs and Markets to 2030*. Abu Dhabi, 2017. [Online]. Available: <https://www.irena.org/Publications/2017/Oct/Electricity-storage-and-renewables-costs-and-markets>
6. Y. Malogulko and V. Lastivka, “The power energy modern storage systems technology research”, *Znanstvena misel journal*, no. 65, pp. 65–68, 2022. (in Ukrainian)
7. N. Bolotnyi, Y. Loienko, and O. Karmazin, “Energy storage systems application for operation management problems in electric power system of Ukraine. Status and development prospects”, *Vidnovluvalna enerhetika*, no. 3(70), pp. 28–35, Jan. 2023m doi: [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2022.3\(70\).28-35](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2022.3(70).28-35) (in Ukrainian)
8. V. Derii, “Electric energy storages”, *System Research in Energy*, no. 1(72), pp. 12–24, Apr. 2023, doi: <https://doi.org/10.15407/srenergy2023.01.012> (in Ukrainian)
9. I. O. Sinchuk and S. M. Boiko, *Systemy nakopychennia elektrychnoi enerhii [Electric energy storage systems]*. Kryvyi Rih, 2020. (in Ukrainian)
10. M. P. Kuznietsov, *Osoblyvosti kombinovanykh enerhosystem z vidnovliuvanyymi dzherelamy enerhii [Features of combined energy systems with renewable energy sources]*. Kyiv: IVE, 2022. (in Ukrainian)
11. *Voltage Characteristics of Electricity Supplied by Public Electricity Networks*, DСТU EN 50160:2023, DP «Ukrainskyi naukovodoslidnyi i navchalnyi tsentr problem standartyzatsii, sertyfikatsii ta yakosti» (DP «UkrNDNTs»).
12. Ukraine, Cabinet of Ministers of Ukraine. (2023, Apr. 21). *Decree of the Cabinet of Ministers of Ukraine no. 373-r, Pro skhvalennia Enerhetichnoi stratehii Ukrainy na period do 2050 roku [On approval of the Energy Strategy of Ukraine until 2050]*. [Online]. Available: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/373-2023-p#Text> (in Ukrainian)

References

1. Ukraine, Verkhovna Rada of Ukraine. (2022, Feb. 15). *Zakon Ukrainy no. 2046-IX, Pro vnesennia zmin do deiakyykh zakoniv Ukrainy shchodo rozvytku ustanovok zberihannia enerhii [On amendments to certain laws of Ukraine regarding the development of energy storage facilities]*. [Online]. Available: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2046-20#Text> (in Ukrainian)
2. “DTEK officially launches Ukraine’s first industrial energy storage system.” DTEK. [Online]. Available: <https://dtek.com/media-center/news/dtek-zapustil-pervuyu-v-ukraine-promyshlennuyu-sistemu-nakopleniya-enerhii/> (in Ukrainian)

Надійшла (received) 17.06.2025

UDC 621.31:621.355

OMELIANENKO HALYNA – Candidate of Technical Sciences (PhD), Docent, Professor of the Department of Electric Power Transmission, National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3276-5476>; e-mail: omeljanenkhalina@gmail.com.

CHERKASHYNA VERONIKA – Doctor of Technical Sciences, Docent, Professor of the Department of Electric Power Transmission, National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5639-9722>; e-mail: veronika2473@gmail.com.

MAKARON ANTON ✉ – Postgraduate Student of the Department of Electric Power Transmission, National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-6181-3822>; e-mail: ant.makarov1997@gmail.com.

THE APPROPRIATENESS OF USING ELECTRICAL ENERGY STORAGE SYSTEMS TO INCREASE THE RELIABILITY OF UKRAINIAN ELECTRICAL NETWORKS

A study was conducted that allowed to substantiate the expedient use of electric energy storage devices in the electrical networks of Ukraine. The relevance of this study is due to the introduction of renewable energy sources into the electrical networks of Ukraine, which contributes to the need for the accumulation of electric energy. To find ways to solve this problem, an analysis of flywheel, superconducting inductive electric energy storage devices, high-capacity batteries, and supercapacitors was performed. Their operating features, advantages, and disadvantages were considered. From the analysis of the advantages, disadvantages, and features of the operation of electrical energy storage devices, it follows that it is advisable to determine the optimal scope of application for each of them and identify their correspondence to the problem existing in electrical networks. The analysis made it possible to do this and justify the optimal scope of application of each type of storage device, as well as to identify their compliance with the problem of power supply in electrical networks. To increase the energy efficiency of the network by optimizing the processes of electricity production and consumption, schemes for connecting electrical energy storage devices have been developed, namely a scheme that takes into account the reliability categories of consumers and a scheme that takes into account the presence of renewable energy sources in the networks. The proposed schemes for connecting electrical energy storage devices allow for the elimination of large backup generating power plants while maintaining the operational reliability of the network. To apply an appropriate type of electric energy storage device when solving a particular problem, a structural model of the correspondence of the type of storage device to the problem being solved has been formed. The application of the formed structural model will allow improving the quality of electric energy, the operational reliability of the network and the energy efficiency of the electric system as a whole.

Keywords: renewable energy sources; electric energy; electric grid; energy efficiency; reliability; energy storage; electric energy quality.

ПАСТУХОВ МИКОЛА ВІЛІЙОВИЧ – кандидат технічних наук, керівник відділу, ПрАТ «ТУРБОГАЗ»; докторант кафедри електричного транспорту та тепловозбудування, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7784-4725>; e-mail: pastuhovn@turbogaz.com.ua.

РЯБОВ ЄВГЕН СЕРГІЙОВИЧ ✉ – кандидат технічних наук, доцент кафедри електричного транспорту та тепловозбудування, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0753-514X>; e-mail: riabov.ievgen@gmail.com.

СТВОРЕННЯ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ ДЕТАНДЕР-ГЕНЕРАТОРНИХ АГРЕГАТИВ

Використання технологій, які спрямовані на підвищення енергоефективності та енергонезалежності технологічних процесів, є ключовим напрямом розвитку нафтогазової промисловості. Для об'єктів газової інфраструктури можливе використання енергії, яка вивільняється при редукуванні газового потоку. Для цього використовуються установки на основі турбодетандерів. Їх використання для генерування електроенергії дозволяє забезпечити електроживлення споживачів об'єкту газової інфраструктури та скоротити або відмовитися від споживання газу для технологічних процесів. З метою підвищення енергонезалежності об'єктів газової інфраструктури доцільно використання резервних джерел живлення. Для цих цілей запропоновано використання когенераційних установок на основі газопоршневих двигунів. Їх використання не потребує дизельного пального, що зменшує експлуатаційні витрати. Теплова енергія, яка виділяється при роботі когенераційної установки, може використовуватися у технологічних процесах об'єкту газової інфраструктури. Для забезпечення безперебійного енергоживлення необхідно застосування систем накопичення енергії. Розглянуто системи накопичення на основі хімічних елементів та інерційних накопичувачів. Запропоновано та проведено аналіз варіантів побудови системи безперервного енергоживлення для об'єктів газової інфраструктури. Показано, що найменші габаритні розміри буде мати установка, яка містить поршневий двигун, інерційний накопичувач та електричний генератор, інтегровані в єдиний модуль. Подальший розвиток запропонованої концепції полягає у створенні систем генерації енергії з використанням детандер-генераторних агрегатів та когенераційних установок. Це забезпечить живлення критичних споживачів при тривалих відключеннях електроенергії, що підвищить стабільність роботи як об'єктів газової інфраструктури, так і зовнішніх споживачів критичної інфраструктури.

Ключові слова: турбодетандер; генератор; накопичувач енергії; система безперебійного живлення; розподілена генерація; електромеханічна система; енергоефективність.

Вступ. Одним із напрямів стабільного розвитку є використання технологій, які спрямовані на утилізацію будь-яких доступних енергетичних відходів. На об'єктах газової інфраструктури для цього доцільно використовувати технології на основі турбодетандерних агрегатів, що дозволяє використовувати енергію, яка вивільняється при редукуванні газу [1–3]. Це дозволяє в певній мірі компенсувати енергію, яка витрачена на компресорній станції для перекачування газу.

У газовій промисловості турбодетандери використовують у таких цілях [4]:

1. підготовка газу на об'єктах газового промислу (видобутку) для транспортування трубопровідною системою (охолодження природного газу, проведення низькотемпературної сепарації);

2. скраплення газу (отримання газового конденсату та інших видів вуглеводнів);

3. приводу електричних генераторів для вироблення електричної енергії при редукуванні надлишкового тиску газу.

Останнє дозволяє забезпечити електроенергією як безпосередньо об'єкт газотранспортної інфраструктури, так і утворити об'єкт розподіленої генерації. В умовах нестабільної роботи електроенергетичної системи це дозволяє забезпечити стабільне функціонування газового об'єкту та споживачів критичної інфраструктури. Втім, стабільне виробництво електроенергії за допомогою детандер-генераторних агрегатів можливе лише в умовах стабільних параметрів потоку газу, який проходить

через турбодетандер. В реальних умовах спостерігаються добові та сезонні коливання споживання газу та його тиску. Це може призвести до випадків, коли вироблення енергії буде не достатньо для живлення споживачів. При відсутності зовнішнього електропостачання це призведе до порушення технологічного процесу роботи обладнання, що негативно впливатиме на функціонування об'єкту газової інфраструктури. Тому для забезпечення стабільного функціонування необхідно використання джерел резервного живлення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На рис. 1 показано загальний вигляд (рис. 1 а) та принципову схему вироблення електроенергії (рис. 1 б) на об'єкті газової інфраструктури, на якому застосовано детандер-генераторний агрегат.

Детандер-генераторні агрегати мегаватної потужності комплектуються синхронними турбогенераторами промислової частоти номінальною напругою 6(10) кВ. Таке рішення зменшує капітальні витрати на виготовлення детандер-генераторного агрегату та забезпечує більш просте підключення до електричної мережі. Електроенергія, яка виробляється детандер-генераторним агрегатом, споживається на об'єкті газової інфраструктури та передається до мережі зовнішнього електропостачання.

Найбільшу лінійку детандер-генераторних агрегатів серед вітчизняних виробників пропонує ПрАТ «ТУРБОГАЗ» [5]. Технічні параметри детандер-генераторних агрегатів наведено у табл. 1.

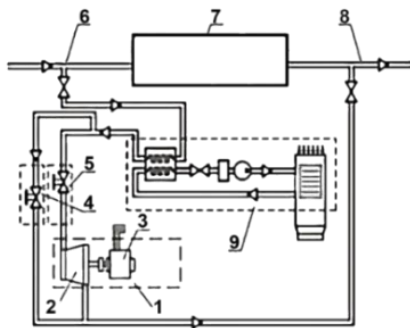


Таблиця 1 – Технічні параметри детандер-генераторів виробництва ПрАТ «ТУРБОГАЗ» [5]

Найменування детандер-генераторного агрегату	Місце встановлення	Витрата газу, млн. м ³ /доба	Номінальна потужність, кВт
УТДУ-4000-4,2-3-УХЛ4	ГРС м. Запоріжжя	2,6...3,02	4000
УДЕУ-2500-У2	ГС «Солоха», ГПУ «Полтавагазвидобування»	1,4...4,2	2500
ДГУ-8	ГРС «Сміла», УМГ «Черкаситрансгаз»	0,043	8
УТДУ-4000-4,5-4,5-УХЛ4	ГРС м. Сєвєродонецьк	4,2...5,9	4000
УТДУ-4000-УХЛ4	ГРС м. Одеса	0,8...2,4	4000
УКС-2-300	КС «Задніпровская», УМГ «Черкаситрансгаз»	0,1...0,5	8
УДЕУ-2500	ГРС-7 Дніпровського ЛП УМГ	1,35...4,5	2500



а



б

1 – турбодетандерний агрегат; 2 – турбодетандер; 3 – електричний генератор; 4,5 – вентилі; 6 – вхідний трубопровід; 7 – газорозподільча станція; 8 – вихідний трубопровід; 9 – підігрівач

Рисунок 1 – Детандер-генераторна енергетична установка:
а – загальний вигляд утилізаційної детандер-генераторної енергетичної установки УДЕУ-2500

б – схема підключення детандер-генераторного агрегату [1]

Як вказано вище, при несприятливих параметрах потоку газу, який проходить через турбодетандер, та відсутності зовнішнього електропостачання можливе порушення працездатності об'єкту газової інфраструктури. Для цього необхідно використання

джерел резервного живлення. Такий підхід широко застосовується при побудові систем електроживлення для data-центрів, телекомунікаційних компаній, фармакологічних та хімічних виробництв і т. д., де безперебійне живлення є критично важливим для функціонування об'єкту.

Метою роботи є аналіз варіантів створення системи електроживлення з використанням детандер-генераторних агрегатів.

Результати дослідження. Для створення системи безперебійного енергоживлення необхідно застосування накопичувачів енергії. На сьогодні на ринку представлені системи накопичення енергії багатьох виробників [6–8]. Найпоширенішими є системи, які використовують хімічні елементи. На рис. 2 а показано типову конструкцію модуля накопичення енергії. Його основними елементами є акумуляторні батареї, мережевий інвертор, система охолодження тощо. Альтернативою хімічним елементам є використання інерційних накопичувачів (рис. 2 б).

В таких системах акумулювання енергії здійснюється за рахунок кінетичної енергії маховика, який обертається. Перетворення електричної енергії у механічну і навпаки здійснюється електромеханічним перетворювачем енергії (електричною машиною). Незважаючи на можливість створення систем накопичення високої ємності, які можуть забезпечити живлення споживачів тривалий час, більш доцільним вбачається використання установок, які працюють на викопному паливі. А системи накопичення енергії використовуються нетривалий час, який необхідний для введення в дію резервного джерела або компенсації перевантаження. Ця концепція використана в установці mtu KineticPowerPacks [9] (рис. 3), яка поєднує інерційний накопичувач енергії та поршневий двигун.

Таким чином, на поточний момент існують технології для систем безперебійного живлення, які можуть бути використані при побудові системи електроживлення з використанням детандер-генераторних агрегатів.



а

б

Рисунок 2 – Накопичувачі енергії

а – улаштування модулю системи накопичення енергії [10]; б – інерційний накопичувач [11]



Рисунок 3 – Загальний вигляд mtu KineticPowerPacks [12]

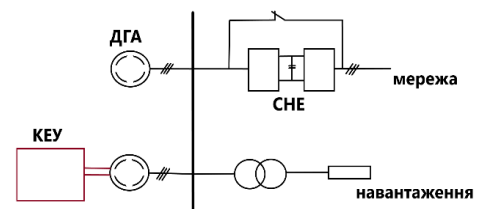
Для забезпечення безперебійної роботи обладнання об'єкту газотранспортної інфраструктури, в тому числі протягом часу запуску та включення, поршневої енергетичної установки необхідно застосування систем накопичення енергії. При використанні систем накопичення енергії з'єднання різних джерел можливе як по шині змінного струму [13, 14], так і по шині постійного струму [15, 16].

На рис. 4 показані варіанти схеми з об'єднанням по шині змінного струму.

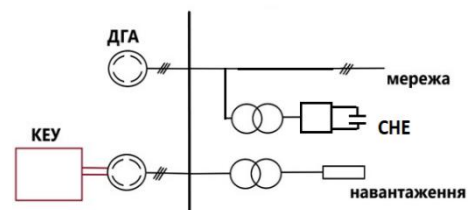
Перевагами схем, показаних на рис. 4, є використання серійного електрообладнання. Певний недолік полягає в тому, що для забезпечення робочої напруги 6(10) кВ необхідне використання додаткових трансформаторів у складі перетворювачів системи накопичення енергії. Це призводить до збільшення масо-габаритних показників та вартості системи накопичення енергії.

При застосуванні енергетичної установки по типу mtu Kinetic PowerPack також використовується підключення по шині змінного струму [17] (рис. 5).

Перевагами використання установки mtu Kinetic PowerPack є мінімізація простору для її встановлення, оскільки всі компоненти інтегровані в єдину систему. Та водночас це ускладнює конструкцію, що є певним недоліком.



а



б

ДГА – детандер-генераторний агрегат; KEU – когенераційна енергетична установка; CNE – система накопичення енергії

Рисунок 4 – Варіант системи живлення з системи накопичення енергії з подвійним перетворенням та об'єднанням по шині змінного струму
а – з подвійним перетворенням енергії,
б – з паралельним підключенням

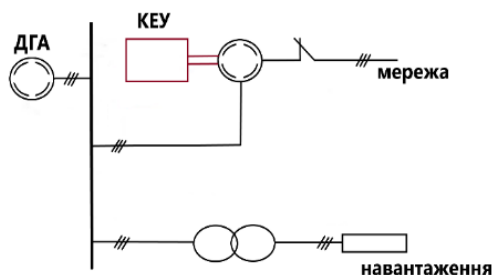


Рисунок 5 – Підключення установки mtu Kinetic PowerPack (позначення – див. рис. 4)

Можливим варіантом є створення системи з об'єднанням по шині постійного струму (рис. 6).

Перевагами такої системи є можливість оптимізації детандер-генераторного агрегату, зокрема, використання безредукторного приводу високошвидкісного генератора та використання. Недолік такої схеми полягає у більшій кількості обладнання.

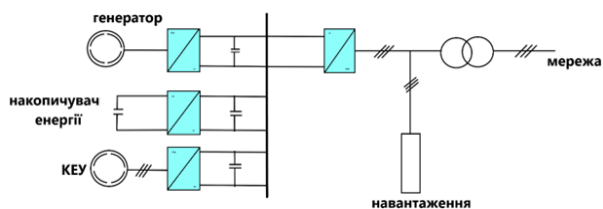


Рисунок 6 – Варіант системи живлення з об'єднанням по постійному струму

Запропоновані варіанти систем електроживлення з використанням детандер-генераторних агрегатів потребують подальших досліджень, що включають використання фактичних даних по енергоспоживанню на об'єктах газової інфраструктури, врахування масогабаритних та вартісних показників обладнання, визначення раціональної структури системи тощо. Подальшим розвитком напрямку є створення систем розподіленої генерації для оптимізації роботи систем електропостачання [18].

Висновки. Для підвищення ефективності об'єктів газової інфраструктури доцільне використання детандер-генераторних агрегатів, які забезпечують використання енергії, яка вивільняється при редуванні. Важливим напрямом є виробництво електроенергії енергоживлення об'єкту газової інфраструктури та інших споживачів.

При створенні систем електроживлення з використанням детандер-генераторних агрегатів необхідно використання додаткових автономних джерел та систем накопичення енергії. Перші забезпечать енергоживлення при недостатності потужності детандер-генераторного агрегату, другі забезпечать безперебійність живлення.

Запропоновані варіанти побудови систем електроживлення з використанням детандер-генераторних агрегатів та відзначено, що вибір найбільш ефективного варіанту потребує проведення комплексних досліджень.

Список літератури

1. Моїсєєв О. М. Електромеханічний комплекс автономного електроживлення з турбодетандером для станцій газотранспортування : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.09.03. Харків, 2012. 19 с.
2. Підвищення ефективності роботи газорозподільної станції в умовах змінного навантаження / Л. Волянська та ін. *Наукові технології*. 2024. Т. 62, № 2. С. 209–218. DOI: <https://doi.org/10.18372/2310-5461.62.18818>.
3. Говдяк Р. М. Утилізація енергії тиску природного газу в турбодетандерних установках на об'єктах газової промисловості. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2014. Т. 14, № 1. С. 7–12.
4. Високотехнологічні автономні турбодетандерні електричні станції задля енергобезпеки та енергонезалежності : монографія / М. А. Ткачук та ін. Харків : ФОП Панов А. М., 2025. 196 с.
5. TurboGaz – турбодетандерні установки та енергетичні рішення. *Турбогаз* | *TURBOGAZ*. URL: <https://turbogaz.com.ua> (дата звернення: 27.04.2025).
6. ABB. UPS Systems. *UPS and Power Conditioning*. URL: <https://new.abb.com/ups/systems> (дата звернення: 27.04.2025).
7. Energy Storage System. *mtu Solutions – Sustainable power that matters*. URL: <https://www.mtu-solutions.com/eu/en/applications/power-generation/power-generation-products/energy-storage-system.html> (дата звернення: 27.04.2025).
8. Toshiba International Corporation. *Toshiba | Business to Business Integrated Solutions*. URL: <https://www.toshiba.com/tic/power-electronics> (дата звернення: 27.04.2025).
9. mtu Kinetic PowerPack. *mtu Solutions – Sustainable power that matters*. URL: <https://www.mtu-solutions.com/eu/en/applications/power-generation/power-generation-products/mtu-kinetic-powerpack.html> (дата звернення: 27.04.2025).
10. X-Pact® Battery Storage. *Leading partner in the world of metals - SMS group GmbH*. URL: <https://www.sms-group.com/services/x-pact-battery-storage> (дата звернення: 27.04.2025).
11. Regenerative drives and motors unlock the power of flywheel energy storage to stabilize Europe's grids | ABB. *ABB*. URL: <https://new.abb.com/news/detail/93092/regenerative-drives-and-motors-unlock-the-power-of-flywheel-energy-storage-to-stabilize-europes-grids> (дата звернення: 27.04.2025).
12. Rolls-Royce: mtu Kinetic PowerPack approved for HVO. *Powertrain International*. URL: <https://www.powertraininternationalweb.com/powergen/rolls-royce-mtu-kinetic-powerpack-approved-for-hvo/> (дата звернення: 27.04.2025).
13. Tammemäe T., Nieto C. Microgrid and Battery Energy Storage. Enabling low-carbon operations with new revenue streams for data centers. ABB Ltd., 2023. 14 с. URL: <https://library.e.abb.com/public/bf60031827274b0899efe5bae0eb9c0e/Microgrid%20and%20Battery%20Energy%20Storage%209AKK108467A5981%20REV.B.pdf> (дата звернення: 27.04.2025).
14. Grid-Connected Energy Storage Systems: State-of-the-Art and Emerging Technologies / G. G. Farivar et al. *Proceedings of the IEEE*. 2022. Vol. 111, no. 4. P. 397–420. DOI: <https://doi.org/10.1109/jproc.2022.3183289>.
15. Gajewski P., Pieńkowski K. Control of the hybrid renewable energy system with wind turbine, photovoltaic panels and battery energy storage. *Energies*. 2021. Vol. 14, no. 6. 1595. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14061595>.
16. Review of power sharing, voltage restoration and stabilization techniques in hierarchical controlled DC microgrids / Y. Han et al. *IEEE Access*. 2019. Vol. 7. P. 149202–149223. DOI: <https://doi.org/10.1109/access.2019.2946706>.
17. Maluck L. mtu Kinetic PowerPacks: How Dynamic Uninterruptible Power Supply systems work. *mtu Solutions – Sustainable power that matters*. URL: <https://www.mtu-solutions.com/en/en/stories/power-generation/ups-dups-and-a-lot-of-kinetic-energy-how-dynamic-uninterruptible-power-supply-systems-work.html> (дата звернення: 27.04.2025).
18. Самойлик О. В., Курбака Г. В. Оптимізація засобів розподіленої генерації у складі локальних електротехнічних

комплексів. *Молодий вчений*. 2019. № 5 (69). С. 272–275. DOI: <https://doi.org/10.32839/2304-5809/2019-5-69-60>. (англійською)

References

1. A. N. Moiseyev, "Electromechanical complex of independent power supply with turbodetender for gas-transport stations", extended abstract of dissertation of Candidate of Technical Sciences, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute," Kharkiv, 2012. (in Ukrainian)
2. L. Volianska, G. Nikitina, V. Ratynskiy, and I. Babichev, "Increasing the efficiency of gas distribution station operation in conditions of variable capacity", *Science-Based Technologies*, vol. 62, no. 2, pp. 209–218, Jul. 2024, doi: <https://doi.org/10.18372/2310-5461.62.18818> (in Ukrainian)
3. R. M. Hovdiak, "Utylizatsiia enerhii tysku pryrodnoho hazu v turbodetandernykh ustanovkakh na ob'ekтах hazovoi promyslovosti [Utilisation of natural gas pressure energy in turboexpander units at gas industry facilities]", *Prospecting and Development of Oil and Gas Fields*, vol. 14, no. 1, pp. 7–12, 2014. (in Ukrainian)
4. M. A. Tkachuk, I. V. Babichev, M. A. Hnatiuk, and A. A. Vysokotekhnolohichni avtonomni turbodetanderni elektrychni stantsii zadlia enerhobezpeky ta enerhonezalezhnosti [High-tech autonomous turbodetender power stations for energy security and energy independence]. Kharkiv: FOP Panov A. M., 2025. (in Ukrainian)
5. "Турбогаз | TURBOGAZ." Турбогаз | TURBOGAZ. Accessed: Apr. 27, 2025. [Online]. Available: <https://turbogaz.com.ua>
6. ABB. "UPS systems." UPS and Power Conditioning. Accessed: Apr. 27, 2025. [Online]. Available: <https://new.abb.com/ups/systems>
7. "Energy Storage System." mtu Solutions – Sustainable power that matters. Accessed: Apr. 27, 2025. [Online]. Available: <https://www.mtu-solutions.com/eu/en/applications/power-generation/power-generation-products/energy-storage-system.html>
8. "Toshiba International Corporation." Toshiba | Business to Business Integrated Solutions. Accessed: Apr. 27, 2025. [Online]. Available: <https://www.toshiba.com/tic/power-electronics>
9. "mtu Kinetic PowerPack." mtu Solutions – Sustainable power that matters. Accessed: Apr. 27, 2025. [Online]. Available: <https://www.mtu-solutions.com/eu/en/applications/power-generation/power-generation-products/mtu-kinetic-powerpack.html>
10. "X-Pact® battery storage." Leading partner in the world of metals - SMS group GmbH. Accessed: Apr. 27, 2025. [Online]. Available: <https://www.sms-group.com/services/x-pact-battery-storage>
11. "Regenerative drives and motors unlock the power of flywheel energy storage to stabilize Europe's grids | ABB." ABB. Accessed: Apr. 27, 2025. [Online]. Available: <https://new.abb.com/news/detail/93092/regenerative-drives-and-motors-unlock-the-power-of-flywheel-energy-storage-to-stabilize-europes-grids>
12. "Rolls-Royce: mtu Kinetic PowerPack approved for HVO." Powertrain International. Accessed: Apr. 27, 2025. [Online]. Available: <https://www.powertraininternationalweb.com/powergen/rolls-royce-mtu-kinetic-powerpack-approved-for-hvo/>
13. T. Tammemäe and C. Nieto, "Microgrid and Battery Energy Storage. Enabling low-carbon operations with new revenue streams for data centers", ABB Ltd., 2023. Accessed: Apr. 27, 2025. [Online]. Available: <https://library.e.abb.com/public/bf60031827274b0899efe5bae0eb9c0e/Microgrid%20and%20Battery%20Energy%20Storage%209AKK108467A5981%20REV.B.pdf>
14. G. G. Farivar et al., "Grid-Connected energy storage systems: State-of-the-art and emerging technologies", *Proceedings of the IEEE*, vol. 111, no. 4, pp. 397–420, 2022, doi: <https://doi.org/10.1109/jproc.2022.3183289>
15. P. Gajewski and K. Pieńkowski, "Control of the hybrid renewable energy system with wind turbine, photovoltaic panels and battery energy storage", *Energies*, vol. 14, no. 6, Mar. 2021, Art. no. 1595, doi: <https://doi.org/10.3390/en14061595>
16. Y. Han, X. Ning, P. Yang, and L. Xu, "Review of power sharing, voltage restoration and stabilization techniques in hierarchical controlled DC microgrids", *IEEE Access*, vol. 7, pp. 149202–149223, 2019, doi: <https://doi.org/10.1109/access.2019.2946706>
17. L. Maluck, "mtu Kinetic PowerPacks: How Dynamic Uninterruptible Power Supply systems work." mtu Solutions – Sustainable power that matters. Accessed: Apr. 27, 2025. [Online]. Available: <https://www.mtu-solutions.com/cn/en/stories/power-generation/ups-dups-and-a-lot-of-kinetic-energy-how-dynamic-uninterruptible-power-supply-systems-work.html>
18. O. Samoiluk and H. Kurbaka, "Optimization of means of distributed generation in the structure of local electrotechnical complexes", *Young Scientist*, no. 5 (69), pp. 272–275, May 20196 doi: <https://doi.org/10.32839/2304-5809/2019-5-69-60>

Надійшла (received) 07.06.2025

UDC 621.31:621.6

PASTUKHOV MYKOLA – Candidate of Technical Sciences (PhD), Head of Department, PJSC "TURBOGAZ"; Doctoral Student of the Department of Electric Transport and Locomotive Engineering, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7784-4725>; e-mail: pastuhovn@turbogaz.com.ua.

RIABOV YEVHEN ✉ – Candidate of Technical Sciences (PhD), Associate Professor of the Department of Electric Transport and Locomotive Engineering, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0753-514X>; e-mail: iabov.ievgen@gmail.com.

CREATION OF POWER SUPPLY SYSTEMS USING EXPANDER-GENERATOR UNITS

The use of technologies aimed at increasing energy efficiency and energy independence of technological processes is a key direction in the development of the oil and gas industry. For gas infrastructure facilities, it is possible to use the energy released when reducing the gas flow. For this purpose, installations based on turboexpanders are used. Their use for generating electricity allows to provide power supply to consumers of the gas infrastructure facility and reduce or abandon gas consumption for technological processes. In order to increase the energy independence of gas infrastructure facilities, it is advisable to use backup power sources. For these purposes, the use of cogeneration plants based on gas piston engines is proposed. Their use does not require diesel fuel, which reduces operating costs. Thermal energy released during the operation of the cogeneration plant can be used in technological processes of the gas infrastructure facility. To ensure uninterrupted power supply, it is necessary to use energy storage systems. Storage systems based on chemical elements and inertial accumulators are considered. The options for constructing an uninterrupted power supply system for gas infrastructure facilities have been proposed and analyzed. It has been shown that the smallest overall dimensions will be those of a plant that contains a piston engine, an inertial storage device and an electric generator integrated into a single module. Further development of the proposed concept consists in creating energy generation systems using expander-generator units and cogeneration plants. This will ensure the power supply of critical consumers during long power outages, which will increase the stability of operation of both gas infrastructure facilities and external consumers of critical infrastructure.

Keywords: turboexpander; generator; energy storage; uninterruptible power supply system; distributed generation; electromechanical system; energy efficiency.

РУДЕВИЧ НАТАЛІЯ ВАЛЕНТИНІВНА ✉ – доктор педагогічних наук, професор, професор кафедри автоматизації та кібербезпеки енергосистем, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2858-9836>; e-mail: natalia.rudevich@khpi.edu.ua.

ГАПОН ДМИТРО АНАТОЛІЙОВИЧ – доктор технічних наук, доцент, завідувач кафедри автоматизації та кібербезпеки енергосистем, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8609-9707>; email: dmytro.hapon@khpi.edu.ua.

ЛАЗАРЄВ МИКОЛА ІВАНОВИЧ – доктор педагогічних наук, професор, професор кафедри педагогіки, методики та менеджменту освіти, Харківський національний університет ім. В. Н. Каразіна, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9742-4739>; e-mail: lazarev@uipa.edu.ua.

ШВЕЦЬ СЕРГІЙ ВІКТОРОВИЧ – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматизації та кібербезпеки енергосистем, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3716-141X>; email: serhii.shvets@khpi.edu.ua.

МЕТОД НАВЧАННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЇ МІКРОПРОЦЕСОРНИХ СИСТЕМ РЕЛЕЙНОГО ЗАХИСТУ ТА АВТОМАТИКИ

З широким впровадженням цифрової техніки в енергетику актуальною постала проблема підготовки фахівців для експлуатації мікропроцесорних систем релейного захисту та автоматики, що можуть мати складні ієрархічні структури. Проаналізовано види експлуатаційних робіт інженерів з релейного захисту та автоматики. Виявлено, що основним видом роботи є перевірка технічного стану системи релейного захисту та автоматики, що передбачає встановлення причинно-наслідкових зв'язків між призначенням, побудовою, принципом дії та параметрами. Побудовано алгоритм технічної перевірки мікропроцесорної системи релейного захисту та автоматики, що відображає послідовність дій у разі низхідної перевірки, як найбільш розповсюдженій. Виявлено, що умовно процес технічної перевірки мікропроцесорних систем релейного захисту та автоматики можна розділити на 3 етапи, а саме розроблення завдання на технічну перевірку, перевірку технічного стану та встановлення показників функціонування системи релейного захисту та автоматики. Визначено причинно-наслідкові зв'язки, які складають основу розв'язання завдань на цих 3 етапах. У разі розроблення завдання на технічну перевірку на підставі причинно-наслідкових зв'язків формуються вимоги щодо перевірки системи релейного захисту та автоматики. Безпосередньо при перевірці технічного стану необхідно встановлення причинно-наслідкових зв'язків між вимогами щодо перевірки та принципом дії, побудовою програмного й апаратного забезпечення для складових різних рівнів ієрархії та всієї системи релейного захисту та автоматики. Етап, що пов'язаний з визначенням показників функціонування, передбачає встановлення причинно-наслідкових зв'язків між принципом дії й побудовою та параметрами складових всіх рівнів ієрархії та системи в цілому. Обґрунтовано узагальнену модель методу навчання експлуатації мікропроцесорних систем релейного захисту та автоматики на основі причинно-наслідкових зв'язків, що включає 4 етапи. На підставі узагальненої моделі розроблено методику навчання експлуатації конкретних мікропроцесорних систем релейного захисту та автоматики, що вивчаються в дисциплінах освітньої програми «Електроенергетика».

Ключові слова: причинно-наслідкові зв'язки; метод навчання; експлуатація; мікропроцесорні системи релейного захисту та автоматики.

Постановка проблеми. Безперервність процесу виробництва, передачі, розподілу та споживання електричної енергії, а також складність об'єктів управління, призвело до системної автоматизації енергосистем. Необхідність у пристроях релейного захисту та автоматики з'явилась з самого початку створення електричних систем. Спочатку це були прості пристрої побудовані на електромеханічних реле. Надалі використання електронної елементної бази для побудови пристроїв релейного захисту та автоматики дозволило значно розширити їх функціональні можливості. До недавнього часу вся система професійної підготовки майбутніх фахівців з релейного захисту та автоматики була побудована з урахуванням технічних можливостей аналогової та електромеханічної елементної бази в контексті знань моделі освіти. Широке використання мікропроцесорної техніки в енергетиці дозволило створювати цілі системи релейного захисту та

автоматики, які являють собою комбіновані багатофункціональні пристрої, що об'єднують різні функції захисту, автоматики, контролю, місцевого та дистанційного керування тощо. Сучасні системи релейного захисту та автоматики (СРЗА), які ще можуть називатися «мікропроцесорні релейні термінали», «мікропроцесорні термінали», «приладові модулі», «релейні термінали» або просто «цифрові захисти», являють собою складні програмно-апаратні комплекси зі складними ієрархічними структурами (рис. 1).

Принципи побудови та алгоритми, які використовуються в мікропроцесорних релейних терміналах, значно відрізняються від тих, що використовуються в електромеханічних та аналогових релейних захистах через суттєво різні технічні основи та способи обробки інформації.





Рисунок 1 – Ієрархічна структура мікропроцесорної СРЗА

У навчальній літературі на сьогодні достатньо повно розглянуті принципи апаратної реалізації мікропроцесорного релейного захисту, систематизовані основні його елементи та розглянуті типові структури [1, 2]. У свою чергу інформація щодо алгоритмічного забезпечення цифрових захистів у навчальній літературі носить досить епізодичний та фрагментарний характер і подається як варіант реалізації захисту певного виробника [3–5]. У переважній більшості навчальний матеріал має описовий характер, практично відсутня інформація щодо особливостей експлуатації цифрових СРЗА.

При проектуванні чи експлуатації реальних мікропроцесорних СРЗА інженер керується не лише наявними шаблонами, а й постійно вимушений встановлювати причинно-наслідкові зв'язки між призначенням, принципом функціонування, побудовою та параметрами пристрою [6]. З огляду на це задля забезпечення продуктивно-синтетичного рівня сформованості професійних знань та умінь у майбутніх інженерів з релейного захисту та автоматики енергосистем процес навчання повинен бути побудований на основі встановлення причинно-наслідкових зв'язків між різними підсистемами знань. В роботі [7] запропоновано зміст навчання проектуванню цифрових СРЗА на базі причинно-наслідкових ланцюгів знань, що дозволяє ефективно формувати проектну компетентність у майбутніх інженерів.

Мета статті – обґрунтування та розроблення методу навчання експлуатації мікропроцесорних систем релейного захисту та автоматики на основі причинно-наслідкових зв'язків.

Відповідно до мети роботи визначено наступні завдання:

1. Аналіз експлуатаційних видів робіт інженерів з релейного захисту та автоматики.
2. Побудова алгоритму технічної перевірки мікропроцесорної СРЗА.
3. Розробка методу навчання експлуатації мікропроцесорних СРЗА.

Основні матеріали дослідження. Експлуатаційна діяльність інженерів з релейного захисту та автоматики передбачає проведення наступних видів робіт [8, 9]:

- проведення робіт з технічної перевірки пристроїв;
- проведення робіт з виявлення та усунення причин некоректної роботи пристроїв;
- ведення технічної документації щодо пристроїв.

Роботи з технічної перевірки пристроїв захисту та автоматики проводять з метою:

- налаштування пристроїв, що складається з сукупності операцій щодо регулювання, підготовки, увімкнення та забезпечення нормальної роботи в заданих умовах;
- прийому в експлуатацію пристроїв, що в загальному випадку складається з перевірки відповідності проектам змонтованого обладнання, результатів випробувань і комплексного обстеження, підготовленості до нормальної експлуатації, якості монтажних робіт;
- технічного обслуговування пристроїв, що пов'язано з контролем виконання усіх вимог їх використання, спостереженням за справним станом, проведенням оглядів, контролем за дотриманням правил технічної експлуатації, інструкцій заводів-виробників та місцевих інструкцій, усуненням дрібних несправностей, що не вимагають вимкнення обладнання, регулюванням, чищенням, продувкою і змачуванням тощо;
- підвищення рівня експлуатації, оптимізації використання, вдосконалення, модернізації та розроблення нових програмних та технічних засобів пристроїв захисту та автоматики.

Проведення робіт з виявлення та усунення причин некоректної роботи пристроїв захисту та автоматики пов'язано з типовими професійними задачами щодо:

- зовнішнього та внутрішнього огляду,
- перевірки кіл зв'язку,
- заміни дефектних елементів,
- усунення несправностей в схемах підключення,
- налаштування.

Задачами при веденні технічної документації щодо пристроїв захисту та автоматики є запис до журналу проведених робіт та паспортів пристроїв.

Як можна бачити експлуатаційні задачі інженерів з релейного захисту та автоматики насамперед пов'язані з проведенням технічної перевірки, це

вимагає від працівника володіння понятійно-аналітичним та продуктивно-синтетичним мисленням, що передбачає встановлення причинно-наслідкових зв'язків щодо побудови та функціонування СРЗА.

Виконання експлуатаційних задач щодо мікропроцесорних СРЗА передбачає вибір певної послідовності дій. Роботи можуть починатися як з самого верхнього рівня і поступово доходити до нижнього рівня терміналу, так і з самого нижнього рівня і поступово доходити до верхнього рівня ієрархічної СРЗА. Це залежить від складності пристрою, досвіду працівника та конкретних умов. Наприклад, виявлення причин некоректної роботи здійснюється на підставі аналізу отриманих характеристик мікропроцесорного терміналу та його складових.

У разі низхідної перевірки спочатку перевіряються складові елементи першого рівня ієрархії мікропроцесорного терміналу, далі з урахуванням того в якому елементі виявленні відхилення перевіряються елементи його другого рівня і так далі. Перевірка здійснюється доки поки не буде виявлено несправний елемент. При висхідній перевірці спочатку перевіряються складові елементи нижніх рівнів ієрархії, після виявлення та усунення несправності перевіряється вся СРЗА.

У випадку низхідної технічної перевірки мікропроцесорної СРЗА, як найбільш розповсюдженій, алгоритм технічної перевірки можна записати у вигляді, що представлений на рис. 2.

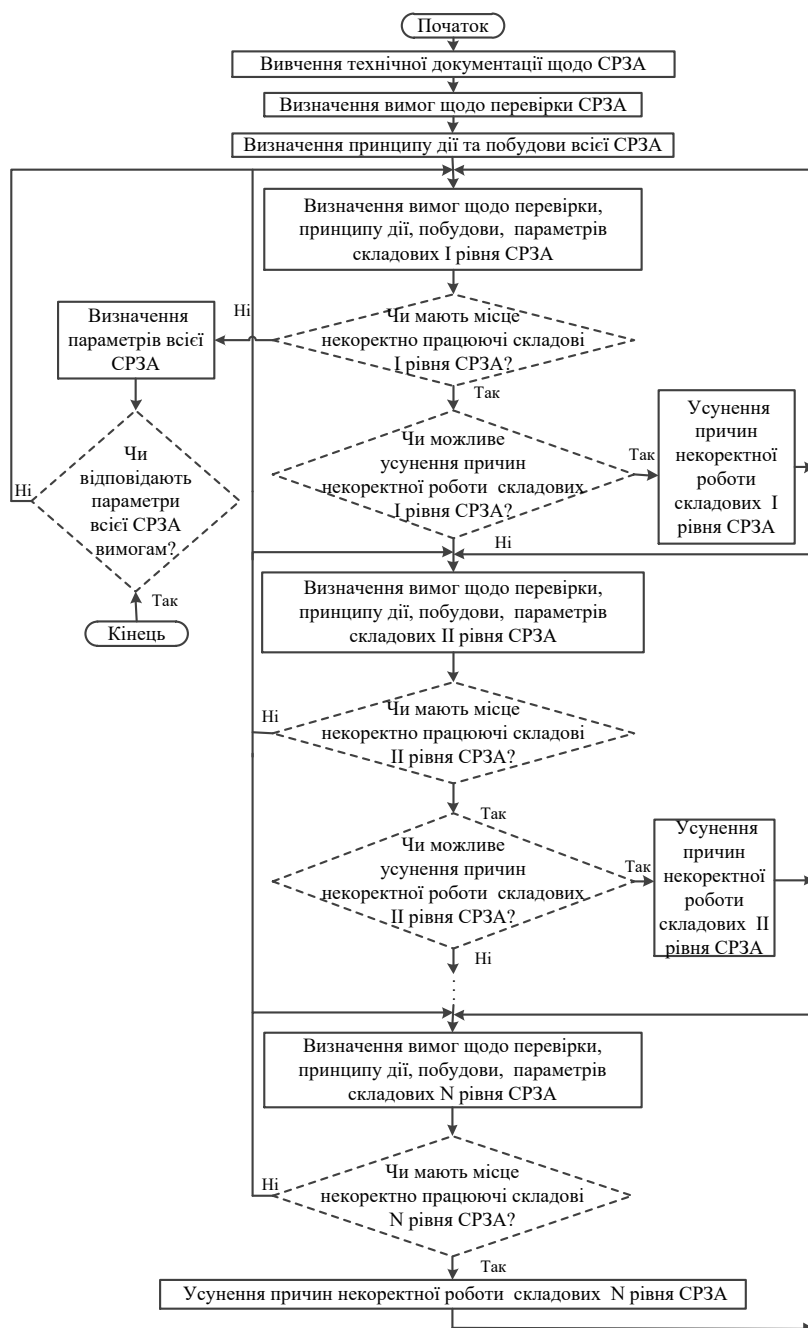


Рисунок 2 – Алгоритм технічної перевірки мікропроцесорної СРЗА

Згідно з наведеним алгоритмом технічної перевірки умовно можна виділити три основні етапи: розроблення завдання на технічну перевірку, перевірка технічного стану, встановлення показників функціонування складових та всієї мікропроцесорної СРЗА.

На заняттях викладачі повинні теоретично підготувати студентів з кожного етапу алгоритму. При вивченні технічної документації та визначенні вимог щодо перевірки СРЗА студент повинен мати навички роботи з технічною документацією щодо терміналів, уміти читати електричні принципи схем, уміти виділяти головне про обсяги й завдання технічного обслуговування пристрою, володіти інформацією щодо можливостей випробувальних установок та методів вимірювання (випробування).

Для успішного виконання робіт, що безпосередньо пов'язані з перевіркою технічного стану та визначенням показників функціонування СРЗА, студент повинен уміти оптимально розбивати систему на функціональні складові для виконання робіт, визначати структурні елементи, що реалізують певні функції та параметри виділених функціональних складових. На практичних або лабораторних заняттях викладачеві доцільно змодельовати спрощену професійну ситуацію, наприклад, перевірити технічний стан наявної на кафедрі цифрової СРЗА. Для чого студенти повинні отримати технічний опис на приладовий модуль, з якого визначити що треба перевіряти і яким чином. Далі, використовуючи наявні випробувальні установки, провести перевірку, визначити показники функціонування та зробити висновки й рекомендації щодо технічного стану мікропроцесорної СРЗА.

Отже, підставою для розроблення завдання на технічну перевірку, перевірки технічного стану та встановлення показників функціонування складових СРЗА електричної системи будуть слугувати наступні причинно-наслідкові зв'язки (рис. 3–5).

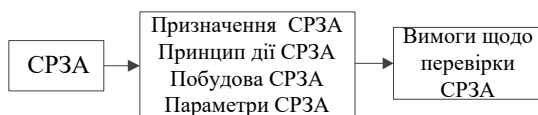


Рисунок 3 – Причинно-наслідкові зв'язки при розробленні завдання на технічну перевірку СРЗА

З урахуванням встановлених причинно-наслідкових зв'язків при виконанні різних завдань щодо технічної перевірки запишемо узагальнену модель методу навчання експлуатації мікропроцесорних СРЗА (рис. 6)

Як приклад здійснимо навчальну технічну перевірку приладового модуля релейного захисту та автоматики синхронного генератора (ПМРЗАСТ), що виготовляється науково-виробничим підприємством «ХАРТРОН-ІНКОР» (м. Харків) [10]. Як було зазначено раніше проведення технічної перевірки умовно складається з трьох видів задач, а саме: розроблення завдання на технічну перевірку, безпосередньо перевірки технічного стану та визначення показників функціонування СРЗА.

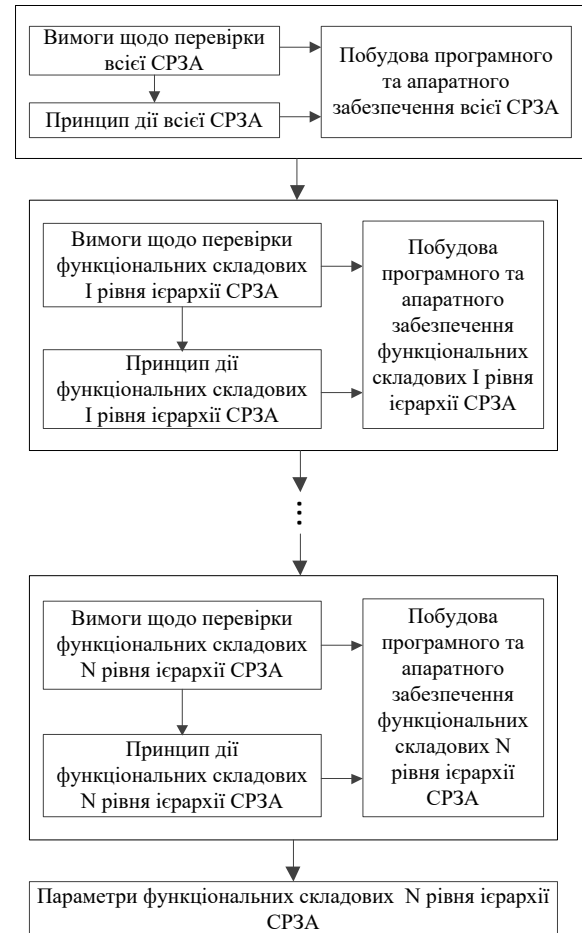


Рисунок 4 – Причинно-наслідкові зв'язки при перевірці технічного стану та встановленні показників функціонування складових N рівня ієрархії мікропроцесорної СРЗА

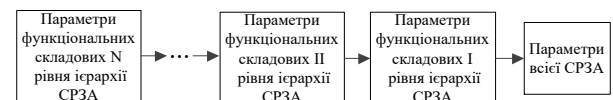


Рисунок 5 – Причинно-наслідкові зв'язки при встановленні показників функціонування усієї мікропроцесорної СРЗА

1. Розробка завдання на технічну перевірку приладового модуля релейного захисту та автоматики синхронного генератора.

Для здійснення технічної перевірки приладового модуля релейного захисту та автоматики синхронного генератора перш за все необхідно вивчення його структурної схеми, схеми зовнішніх підключень, габаритно-інсталяційного креслення та технічних характеристик [10, рис. 1.1.2, 1.5.1 і 1.5.2, табл. 1.2.1–1.2.6].

До принципу дії приладового модуля релейного захисту та автоматики закладені функції основних захистів синхронного генератора, функції протиаварійної автоматики та діагностики й управління вимикачем.

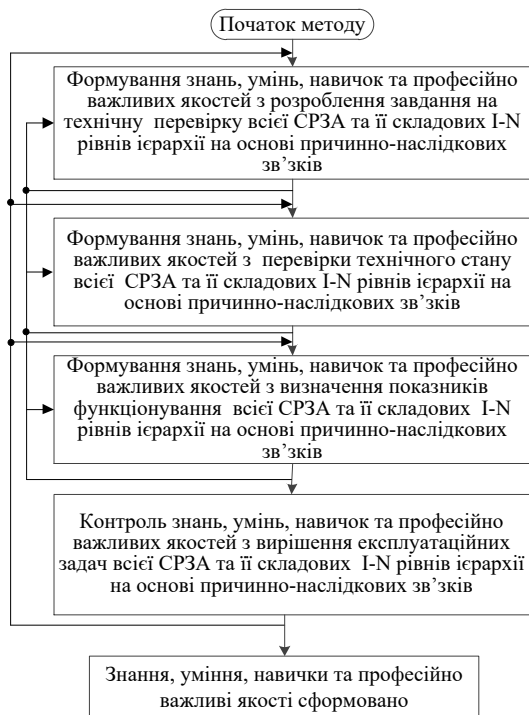


Рисунок 6 – Узагальнена модель методу навчання експлуатації мікропроцесорних СРЗА

Програмна та апаратна реалізація функціональних складових обумовлюють певні параметри та характеристики пристрою. Згідно із зазначеними функціями та побудовою приладового модуля, контрольованими параметрами є струм та напруга зі сьомо входами на кожний параметр ($I_{\text{ном}} = 5 \text{ А}$, $U_{\text{ном}} = 58 \text{ В}$), до експлуатаційних параметрів відносяться уставки та налаштування функцій захисту, автоматики та управління. Параметрами дискретних виходів виступають 26 виходів з постійною напругою 220 В та тривало комутованим струмом до 1 А, 8 виходів з постійною напругою 220 В та тривало комутованим струмом до 5 А. Параметрами дискретних входів є 32 входи з постійною напругою 220 В. Вище названі параметри є параметрами, що потребують перевірки, з урахуванням цього причинно-наслідковий зв'язок з визначення вимог щодо перевірки приладового модуля релейного захисту та автоматики синхронного генератора має вигляд (рис. 7).

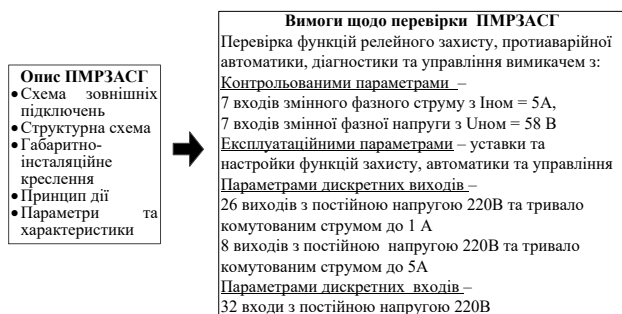


Рисунок 7 – Причинно-наслідковий зв'язок між описом та вимогами щодо перевірки приладового модуля релейного захисту та автоматики синхронного генератора

2. Перевірка технічного стану усього приладового модуля релейного захисту та автоматики синхронного генератора.

Здійсимо перевірку функцій релейного захисту приладового модуля релейного захисту та автоматики синхронного генератора. Згідно із загальних вимог щодо перевірки приладового модуля до функцій релейного захисту, які треба перевірити, відносяться [10]: повздовжній диференціальний захист, поперечний диференціальний захист, максимальний струмовий захист, захист від симетричних перенавантажень, струмовий захист від зворотної послідовності, захист від підвищення напруги, захист від втрати збудження та асинхронного режиму, захист від зворотної потужності, захист від коротких замикань в роторі, захист мінімальної частоти. Апаратна реалізація зазначених функцій релейного захисту згідно із загальної побудови приладового модуля релейного захисту та автоматики синхронного генератора забезпечується [10]: вимірювальним перетворювачем струму та напруги (ВПСН), аналогово-цифровим перетворювачем (АЦП), обчислювальною частиною (ОЧ), цифровим індикатором (ЦІ), клавіатурою (К), комплектом вихідних реле (КВР), контактними колодками – роз'ємами ($S_1, S_2, F_1, F_2, F_3, F_4, F_5, F_6, F_7, F_8, F_9, F_{10}$). Отже, на даному етапі причинно-наслідковий зв'язок з визначення принципу дії та побудови функцій релейного захисту приладового модуля релейного захисту та автоматики синхронного генератора має вигляд, що наведений на рис. 8.

Аналогічним чином можна визначити принцип дії та побудову функцій автоматики, діагностики і управління вимикачем приладового модуля релейного захисту та автоматики синхронного генератора.

3. Розробка завдання на технічну перевірку, перевірка технічного стану та встановлення показників функціонування приладового модуля релейного захисту та автоматики синхронного генератора.

В навчальних цілях здійсимо перевірку функції поперечного диференціального захисту приладового модуля релейного захисту та автоматики синхронного генератора, перелік вихідних сигналів та опис якого візьмемо з керівництва до експлуатації [6, рис. 1.3.7, табл. 1.3.2, Б3, Е2].

Згідно із загальних вимог щодо поперечного диференціального захисту контрольованим параметром є струм в перемичці між нейтраліями паралельних кіл синхронного генератора. А, отже, принципом дії зазначеної функції є формування команди на сигнал або на відключення при умові перевищення струму в перемичці (I_N) над струмом небалансу ($I_{\text{нб}}$).

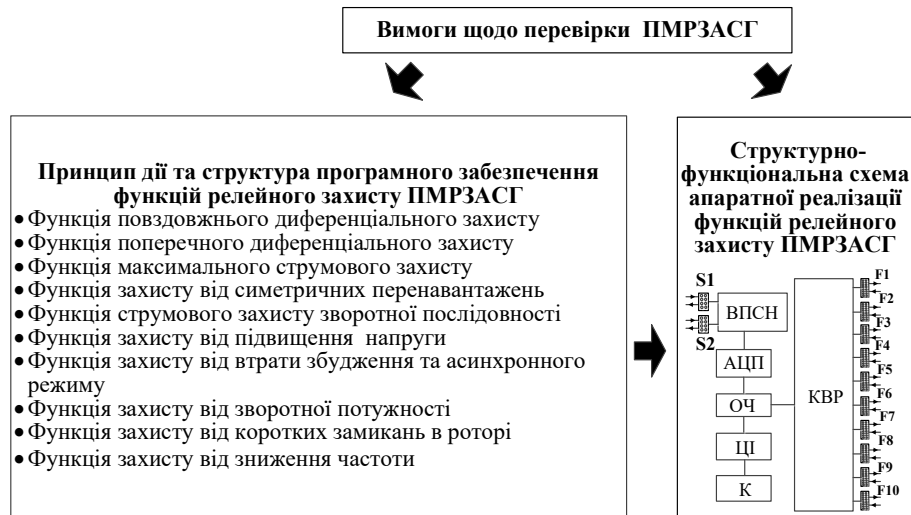


Рисунок 8 – Причинно-наслідковий зв'язок з визначення принципу дії та побудови функцій релейного захисту приладового модуля релейного захисту та автоматики синхронного генератора

Відповідно до схеми зовнішніх підключень приладового модуля релейного захисту та автоматики синхронного генератора до роз'ємів S1/7-S1/8 ВСПН повинна підключатися вторинна обмотка трансформатора струму, що встановлений в перемичці нейтралі синхронного генератора. Отже, для перевірки характеристик спрацьовування поперечного диференціального захисту необхідно до вказаних роз'ємів підключити джерело змінного струму, діюче значення якого не повинно перевищувати 5 А.

Вихідними колами приладового модуля є дискретні слабкострумові та силові сигнали, а, отже для їх виміру потрібно до відповідних роз'ємів під'єднати контрольно-перевірочну апаратуру. Визначимо роз'єми, на виводах яких повинен з'являтися сигнал при введенні в роботу поперечного диференціального захисту приладового модуля релейного захисту та автоматики синхронного генератора.

Відповідно до заводських налаштувань для реалізації роботи поперечного диференціального захисту приладового модуля задіяні наступні роз'єми [10, табл. В13]: F10/3-F10/11 – сигнал аварійної сигналізації; F10/4-F10/2 – сигнал попереджувальної сигналізації; F10/2-F10/10, F4/2-F4/10 – сигнал спрацьовування поперечного диференціального захисту; F6/1-F6/9, F6/3-F6/11, F6/4-F6/12, F6/5-F6/13, F6/6-F6/14, F6/8-F6/16 – сигнал спрацьовування поперечного диференціального захисту на відключення, F6/5-F6/13 – сигнал запуску поперечного диференціального захисту.

У свою чергу дискретний силовий сигнал на відключення генераторного вимикача згідно з даних призначення контактів роз'єму F8, з'явиться на контактах 2, 6, 10 [10, табл. В8].

З урахуванням сказаного причинно-наслідковий зв'язок з визначення вимог щодо перевірки, принципу дії, побудови та параметрів функції поперечного диференціального захисту приладового модуля релейного захисту та автоматики синхронного генератора має вигляд, що представлений на рис. 9.

У разі справності пристрою при певних значеннях контрольованого параметра та параметрів налаштування (експлуатаційні параметри) значення сигналу в кожному колі повинно дорівнювати 220 В постійного струму. Якщо поперечний диференціальний захист буде введено до роботи, то у разі запуску захисту повинен з'явитися сигнал на роз'ємах F6/5-F6/13, далі на роз'ємах F4/2-F4/10, F10/2-F10/10, що відповідає спрацьовуванню захисту. В залежності від того захист працює на сигнал або на відключення повинен з'явитися сигнал на роз'ємах F10/4-F10/2 або на роз'ємах F10/3-F10/11, F6/1-F6/9, F6/3-F6/11, F6/4-F6/12, F6/5-F6/13, F6/6-F6/14, F6/8-F6/16 відповідно.

Прийmemo, що при діючому значенні контрольованого струму 1 А захист повинен спрацьовувати, а, отже, повинен з'являтися вихідний дискретний сигнал на роз'ємах F10/2-F10/10. Припустимо, що сигнал буде відсутній або не буде відповідати нормі, що потребує визначення причин некоректної роботи. Так, відповідно до схеми програмної та апаратної реалізації функції поперечного диференціального захисту перевірки потребують роз'єми S1/7-S1/8, ВПСН, АЦП, обчислювальна частина, роз'єми F10/2-F10/10 комплектів вихідних реле.

Перш за все при визначенні несправностей перевіряють наявність живлення, що передбачає вимір рівня постійної напруги на вході елементу, наприклад, за допомогою вольтметра. Далі, якщо живлення забезпечене для всіх елементів схеми, перевіряють цілісність зв'язків між елементами, наприклад, за допомогою омметра. Наступним кроком є перевірка по черзі параметрів (характеристик) послідовно з'єднаних елементів, що реалізують відповідну функцію. Все це потребує наявності опису та технічних даних для кожного елементу. Здійснимо перевірку елементів кола ВПСН → АЦП → ОЧ → КВР, що забезпечують реалізацію функції поперечного диференціального захисту.

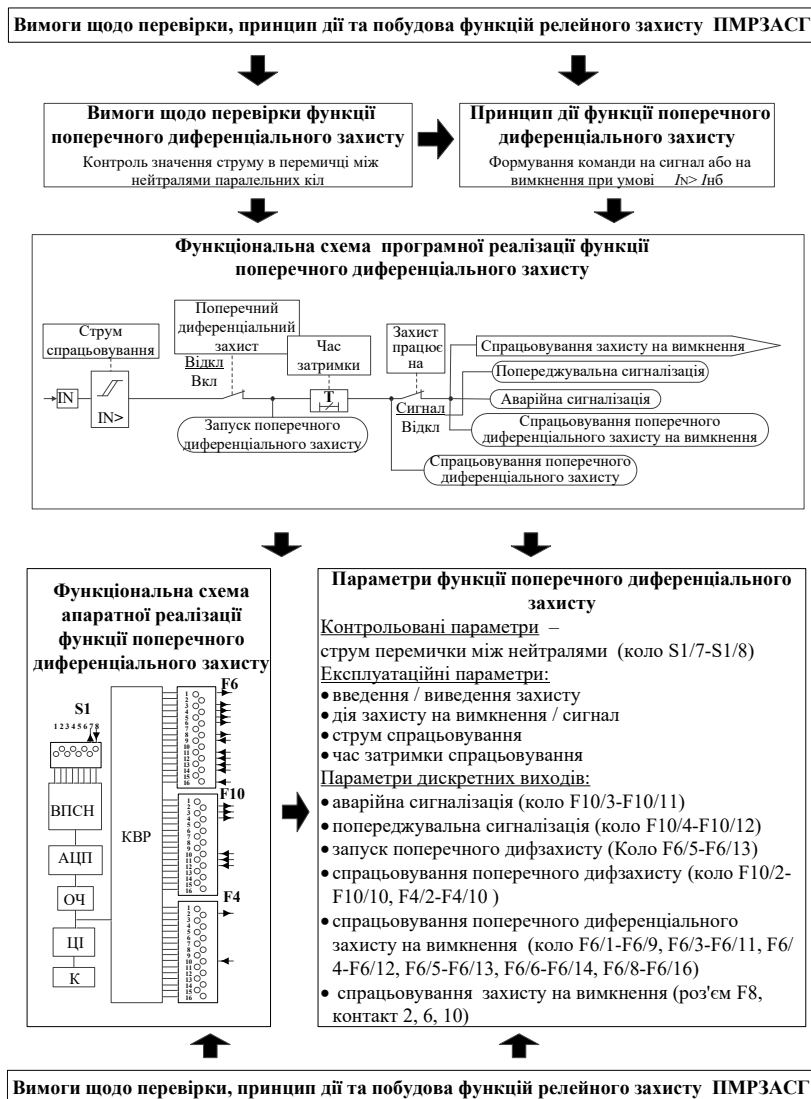


Рисунок 9 – Причинно-наслідкові зв'язки з визначення вимог щодо перевірки, принципу дії, побудови та параметрів функції поперечного диференціального захисту

Приймемо, що складові модуля ВПСН, а саме вимірювальний перетворювач струму та вимірювальний перетворювач напруги, можна перевірити окремо. Задля перевірки вимірювального каналу повинен бути поданий змінний струм певного значення, а вихідним сигналом повинен слугувати сигнал постійної напруги, що відповідає певному значенню вхідного струму. Для одноканального АЦП перевірка зводиться до подачі на вхід сигналу постійної напруги певного рівня та у разі справності отримання на виході цифрового коду, що відповідає рівню вхідної напруги. Для комплексу вихідних реле приймемо, що його складові можна перевірити окремо, а саме реле дискретних виходів (РДВ), реле дискретних входів (РДВх). Припустимо, що принцип функціонування реле дискретних виходів побудований таким чином, що поява напруги на певному виході буде визначатися певним цифровим кодом на його вході. Так, при подачі на вхід блоку РДВ цифрового коду 5 каналу, у разі справності елемента, на вихідних роз'ємах F10/2-F10/10 повинні отримати напругу

220 В. Аналогічним чином можна перевірити будь-який канал блоку РДВ та РДВх. У разі, якщо вихідна напруга будь-якого елемента не відповідає нормі, елемент повинен бути замінений на інший.

У зв'язку з тим, що обчислювальна частина являє собою інтелектуальний елемент, перевірка, що характерна для інших елементів пристрою, не є прийнятною для неї. Несправність в обчислювальній частині найпростіше може бути виявлена тільки шляхом виключення. У випадку, якщо перевірка показала апаратну справність усіх елементів (окрім обчислювальної частини), причинами некоректної роботи може бути апаратний або програмний збій центрального процесора або апаратний збій системної шини.

В якості прикладу побудуємо причинно-наслідковий зв'язок з визначення вимог щодо перевірки, принципу дії, побудови та параметрів АЦП, що реалізований на мікросхемі K572ПВ3 (рис. 10).

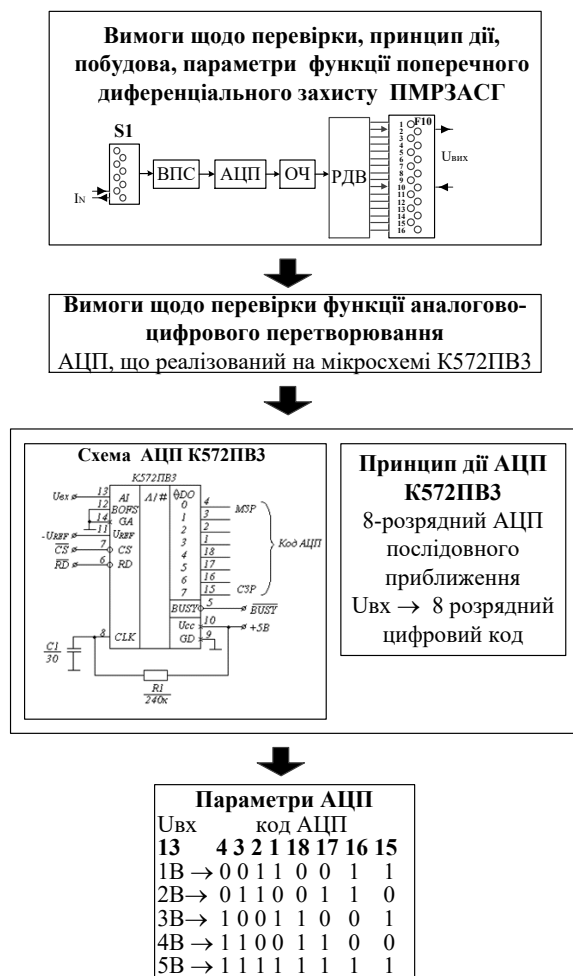


Рисунок 10 – Причинно-наслідкові зв'язки з визначення вимог щодо перевірки, принципу дії, побудови та параметрів аналого-цифрового перетворювача

Після виявлення причин некоректної роботи інженер повинен або замінити несправний модуль у разі наявності запасних частин або демонтувати та відправити фірмі-виробнику з указівкою несправних елементів (каналів). Після заміни несправного модуля необхідно знову провести перевірку необхідних функцій та приладового модуля в цілому.

Аналогічним чином можуть бути визначені вимоги щодо перевірки, принцип дії, побудова та параметри будь-якої функції захисту, а також функцій автоматики, діагностики та управління вимикачем, що загалом будуть визначати параметри всього приладового модуля релейного захисту та автоматики синхронного генератора.

Висновки. В роботі здійснено обґрунтування та розроблення методу навчання експлуатації мікропроцесорних СРЗА на основі причинно-наслідкових зв'язків.

Проаналізовано експлуатаційні види робіт інженерів з релейного захисту та автоматики. Визначено, що основним видом робіт є перевірка технічного стану, що передбачає встановлення причинно-наслідкових зв'язків між різними підсистемами знань щодо мікропроцесорної СРЗА.

Розроблено алгоритм технічної перевірки мікропроцесорної системи релейного захисту, визначено основні етапи щодо виконання, а саме: розроблення завдання на технічну перевірку, перевірка технічного стану, встановлення показників функціонування складових та всієї.

Побудовано узагальнену модель методу навчання експлуатації мікропроцесорних СРЗА з урахуванням встановлених причинно-наслідкових зв'язків при виконанні різних завдань в процесі технічної перевірки.

На основі узагальненої моделі розроблено методику навчання експлуатації конкретних СРЗА, що вивчаються в межах дисциплін професійної підготовки за освітньою програмою «Електроенергетика». Це дозволило збільшити значення показників сформованості знань, умінь, навичок та професійно-важливих якостей з експлуатації мікропроцесорних систем релейного захисту та автоматики на 20 %.

Список літератури

1. Яндульський О. С., Дмитренко О. О. Релейний захист. Цифрові пристрої релейного захисту, автоматики та управління енергетичних систем : навчальний посібник. Київ: НТУУ «КПІ», 2016. 102 с.
2. Дьяченко М. Д., Поднебенная С. К. Цифровая защита (аппаратное и алгоритмическое обеспечение) : навчальний посібник. Маріуполь: ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», 2014. 204 с.
3. Махлін П. В., Костенко С. Ю., Кузьменко О. П. Интеллектуальные пристрої релейного захисту та автоматики [Intelligent relay protection and automation devices] : навчальний посібник. Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2020. 256 с. URL: <https://eir.zp.edu.ua/server/api/core/bitstreams/242f6a8a-2884-4d59-ab68-cc8d5d242bf6/content> (дата звернення: 29.01.2025).
4. Баженов В. М., Одегов М. М. Автоматика электроустановок электроэнергетических систем : навчальний посібник. Харків: Планета Принт, 2022. 186 с.
5. Баран П. М., Кідиба В. П. Цифровой захист ліній електропередавання : навчальний посібник. Львів: Видавництво Національного університету "Львівська політехніка", 2023. 259 с.
6. Рудевіч Н. В. Професійна підготовка майбутніх інженерів з автоматизації енергосистем на основі каузального навчання : монографія. Харків: Видавництво «Диса-плюс», 2017. 404 с.
7. Рудевіч Н. В., Гапон Д. А., Лазарев М. І. Модель змісту навчання проектуванню цифрових систем релейного захисту та автоматики енергосистем. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність*. 2024. № 1 (8). С. 100–104. DOI: <https://doi.org/10.20998/2224-0349.2024.01.02>.
8. Міністерство палива та енергетики України. Виробництво та розподілення електроенергії. Частина 1. Розділи: "Експлуатація устаткування електростанцій і мереж, обслуговування споживачів енергії". "Ремонт устаткування електростанцій і мереж". *Довідник кваліфікаційних характеристик професій працівників*. 2001. № 62. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0019558-01#Text> (дата звернення: 22.01.2025).
9. СОУ-Н ЕЕ 35.514:2007. Технічне обслуговування мікропроцесорних пристроїв, релейного захисту, протинаварійної автоматики, електроавтоматики, дистанційного керування та сигналізації від 0,4 кВ до 750 кВ. Правила. Чинний від 2008-01-30. Вид. офіц. Київ, 2007.
10. НВП ХАРТРОН-ІНКОР. Приборный модуль релейной защиты и автоматики. Основные защиты и автоматика генераторов (G010). Руководство по эксплуатации. Харків, 2015. 137 с. URL: https://www.hartron-incor.com.ua/_files/ugd/452358_be34579f0f164a5e8212adbd1e85248b.pdf (дата звернення: 23.01.2025).

References

1. O. S. Yandulskyi and O. O. Dmytrenko, *Releinyi zakhyst. Tsyfrovi prystroi releinoho zakhystu, avtomatyky ta upravlinnia enerhetychnykh system [Relay protection. Digital devices for relay protection, automation and control of power systems]*. Kyiv: NTUU «KPI», 2016. (in Ukrainian)
2. M. D. Diachenko and S. K. Podnebennaia, *Tsifrovaia Zashchita (Apparatnoe i Algoritmicheskoe Obespechenie) [Digital Security (Hardware and Algorithms)]*. Mariupol: DVNZ «Pryaz. derzh. tekhn. un-t», 2014. (in Russian)
3. P. V. Makhlin, S. Yu. Kostenko, and O. P. Kuzmenko, *Intelektualni prystroi releinoho zakhystu ta avtomatyky [Intelligent relay protection and automation devices]*. Zaporizhzhia: NU «Zaporizka politekhnika», 2020. Accessed: Jan. 29, 2025. [Online]. Available: <https://eir.zp.edu.ua/server/api/core/bitstreams/242f6a8a-2884-4d59-a6c8-cc8d5d242bf6/content> (in Ukrainian)
4. V. M. Bazhenov and M. M. Odiehov, *Avtomatyka elektroustanovok elektroenerhetychnykh system [Automation of electrical installations of electric power systems]*. Kharkiv: Planeta Print, 2022. (in Ukrainian)
5. P. M. Baran and V. P. Kidyba, *Tsyfrovyi zakhyst linii elektroperesylannia [Digital protection of power transmission lines]*. Lviv: Vyd-vo Nats. un-tu "Lviv. politekhnika", 2023. (in Ukrainian)
6. N. V. Rudevich, *Profesiina pidhotovka maibutnikh inzheneriv z avtomatyzatsii enerhosystem na osnovi kauzalnogo navchannia [Professional training of future engineers in automation of power systems based on causal learning]*. Kharkiv: Vyd-vo «Dysa-plus», 2017. (in Ukrainian)
7. N. Rudevich, D. Gapon, and M. Lazarev, "Teaching content model for designing digital systems of power grid relay protection and automation", *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Energy: Reliability and Energy Efficiency*, no. 1 (8), pp. 100–104, Jul. 2024, doi: <https://doi.org/10.20998/2224-0349.2024.01.02> (in Ukrainian)
8. Ministry of Fuel and Energy of Ukraine, "Vyrobnystvo ta rozpodilennia elektroenerhii. Chastyna 1. Rozdily: "Ekspluatatsiia ustatkuvannia elektrostantsii i merezh, obsluhovuvannia spozhyvachiv enerhii". "Remont ustatkuvannia elektrostantsii i merezh" [Electricity generation and distribution. Part 1: Chapters: 'Operation of power plant and grid equipment, servicing of energy consumers'. 'Repair of power plant and grid equipment']", *Dovidnyk kvalifikatsiinykh kharakterystyk profesii pratsivnykiv [Handbook of qualification characteristics of employee professions]*, no. 62, 2001. Accessed: Jan. 22, 2025. [Online]. Available: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0019558-01#Text> (in Ukrainian)
9. *Tekhnichne obsluhovuvannia mikroprotseornykh prystroiv, releinoho zakhystu, protyavariinoi avtomatyky, elektroavtomatyky, dystantsiinoho keruvannia ta syhnalizatsii vid 0,4 kV do 750 kV. Pravyly [maintenance of microprocessor devices, relay protection, emergency automation, electric automation, remote control and signalling from 0.4 kV to 750 kV. Rules]*, SOU-N EE 35.514:2007, VAT «LvivORHRES», Kyiv, 2007. (in Ukrainian)
10. SPE HARTRON-INCOR, "Pribornyj modul' relejnoj zashchity i avtomatiki. Osnovnye zashchity i avtomatika generatorov (G010). Rukovodstvo po jekspluatatsii [Instrument module of relay protection and automation. Main protection and automation of generators (G010). Operation Manual]", Kharkiv, AAVH.421453.005 – 119.04 RJe3, 2015. Accessed: Jan. 23, 2025. [Online]. Available: https://www.hartron-incor.com.ua/_files/ugd/452358_be34579f0f164a5e8212adbd1e85248b.pdf (in Russian)

Надійшла (received) 30.01.2025

UDC 621.315:378.14

RUDEVICH NATALIYA ✉ – Doctor of Pedagogical Sciences, Full Professor, Professor of the Department of Automation and Cybersecurity of Power Systems, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2858-9836>; e-mail: natalia.rudevich@khp.edu.ua.

GAPON DMITRIY – Doctor of Technical Sciences, Docent, Head of the Department of Automation and Cybersecurity of Power Systems, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8609-9707>; email: dmytro.hapon@khp.edu.ua.

LAZAREV MYKOLA – Doctor of Pedagogical Sciences, Full Professor, Professor of the Department of Pedagogy, Methodology and Management of Education, V. N. Karazin Kharkiv National University; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9742-4739>; e-mail: lazarev@uipa.edu.ua.

SHVETS SERHIY – Candidate of Technical Sciences (PhD), Docent, Associate Professor of the Department of Automation and Cybersecurity of Power Systems, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3716-141X>; email: serhii.shvets@khp.edu.ua.

LEARNING METHOD IN THE OPERATION OF MICROPROCESSOR SYSTEMS OF RELAY PROTECTION AND AUTOMATION

With the widespread introduction of digital technology in the power industry, the problem of training specialists for the operation of microprocessor relay protection and automation systems, which can have complex hierarchical structures, has become relevant. The types of operational work of relay protection and automation engineers have been analyzed. It has been found that the main type of work is checking the technical condition of the relay protection and automation system, which involves establishing cause-and-effect relationships between the purpose, construction, principle of operation and parameters. An algorithm for technical inspection of the microprocessor relay protection and automation system has been constructed, which reflects the sequence of actions in the case of a downward inspection, as the most common. It has been found that the process of technical inspection of microprocessor relay protection and automation systems can be conditionally divided into three stages, namely, developing a task for technical inspection, checking the technical condition and establishing indicators of the functioning of the relay protection and automation system. Cause-and-effect relationships have been determined, which form the basis for solving tasks at these three stages. In the case of developing a task for technical inspection based on cause-and-effect relationships, requirements for checking the relay protection and automation system are formulated. Directly during the technical condition check, it is necessary to establish cause-and-effect relationships between the inspection requirements and the principle of operation, the construction of software and hardware for components of different levels of the hierarchy and the entire relay protection and automation system. The stage associated with the determination of performance indicators involves the establishment of cause-and-effect relationships between the principle of action and the construction and parameters of components of all levels of the hierarchy and the system as a whole. A generalized model of the method of teaching the operation of microprocessor relay protection and automation systems based on cause-and-effect relationships, which includes four stages, has been substantiated. Based on the generalized model, a methodology for teaching the operation of specific microprocessor relay protection and automation systems studied in the disciplines of the educational program "Electrical Power Engineering" has been developed.

Keywords: causal relationships; learning method; operation; microprocessor system of relay protection and automation.

САВЧЕНКО НАТАЛЯ ПАНАСІВНА – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри мехатроніки та електротехніки, Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7046-0633>; e-mail: natali_a_savchenko@ukr.net.

ДОВГАЛЮК ОКСАНА МИКОЛАЇВНА ✉ – кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри передачі електричної енергії, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1994-619X>; e-mail: Oksana.Dovhaliuk@khpi.edu.ua.

ТРЕТ'ЯК АНДРІЙ ВАЛЕРІЙОВИЧ – кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматики, електроніки та телекомунікацій, Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»; м. Полтава, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3971-3078>; e-mail: tretjak_a.v@ukr.net.

АВТОНОМНА MICROGRID СИСТЕМА ДЛЯ ПОБУТОВИХ СПОЖИВАЧІВ НА БАЗІ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ З ВІДНОВЛЮВАНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ЕНЕРГІЇ

В умовах світової енергетичної кризи все більше постає питання оновлення концепції та принципів організації енергетичних систем, а також підходів до їх керування. Традиційна енергетика та централізоване керування енергосистемою на сьогодні не забезпечує у повній мірі якості та надійності електропостачання споживачів. Обмеженість кількості традиційних енергоресурсів, низький рівень модернізації та автоматизації складових енергосистем та постійне руйнування енергооб'єктів внаслідок воєнних дій в Україні є першочерговою проблемою в енергетиці, що потребує якнайшвидшого вирішення. Саме запровадження енергоефективних технологій альтернативної енергетики та організація енергопостачання у вигляді Microgrid систем з розосередженою генерацією і децентралізацією керування може стати дієвим рішенням питань, пов'язаних з енергоживленням споживачів, особливо побутового сектора. Microgrid, за сутністю свого функціонування, базуються на повній інтелектуалізації управління процесами генерації, розподілення, споживання та збереження електричної енергії, що забезпечує замкнений цикл в енергосистемі з організацією перетоків потужності за ефективним алгоритмом керування. У статті пропонується організація автономної Microgrid системи з використанням у якості джерел розосередженої генерації енергокомплексів «Активних» будинків та мобільних гібридних електростанцій для додаткової генерації та зміни структури мережі. Задля підвищення ефективності функціонування розробленої Microgrid побутових споживачів запропоновано алгоритм керування енергоресурсами в ній. Отримані результати показують доцільність та енергоефективність розробленої системи Microgrid для побутових споживачів. Зроблені висновки стосовно перспективи подальшого розвитку Microgrid у напрямку використання усіх технічних можливостей відновлюваної енергетики для подолання енергетичної кризи у країні та досягнення енергетичної незалежності.

Ключові слова: електрична мережа; Microgrid; відновлюване джерело енергії; розосереджена генерація; гібридна мобільна електростанція; енергокомплекс; «Активний» будинок; режим роботи; інтелектуальне керування; енергоефективність.

Постановка проблеми. Бурхливий розвиток інтелектуальних та інформаційних технологій одночасно з удосконаленням технічних можливостей джерел альтернативної енергетики призвів до появи нового виду організації систем електропостачання споживачів. Побудова систем Smart Grid і Microgrid є багатофакторною і досить складною, бо потребує досконалого керування потоками потужності задля отримання якісних показників електричної енергії та забезпечення досить високих показників надійності електропостачання. Конфігурації таких систем також є інваріантними. Таким чином, постає задача раціонального вибору компонентів Microgrid з подальшим обґрунтуванням їх економічної доцільності з точки зору спроможності запровадження на визначеній території та врахування факторів політики енергоефективності держави і позитивного сприйняття споживачами. Концепція систем Microgrid базується на впровадженні сучасних технологій альтернативної енергетики з повною інтелектуалізацією керування.

Особливістю технології Microgrid систем є активне запровадження децентралізованого електропостачання з розосередженою генерацією від джерел відновлюваної енергії, що встановлюються безпосередньо у споживача, стаціонарно на постійній

основі. Але такий підхід до реалізації нового типу енергосистем є більш дієвим для промислових споживачів, особливо за умови гібридного режиму роботи з традиційною електричною мережею, а також при наявності додаткових потужностей від систем накопичення енергії.

Для побутових споживачів, а особливо приватних домогосподарств реалізація такої Microgrid не завжди є раціональною та економічно вигідною, при цьому така система не є енергонезалежною. Окрім того, для побутових споживачів також важливим питанням є висока вартість електричної енергії, що має тенденцію хаотичного та непередбачуваного зростання. Тому більш обґрунтованим для побутового споживача є автономний режим роботи Microgrid. Таким чином, конфігурація такої Microgrid повинна бути досить гнучкою при різких перепадах навантаження впродовж доби, відповідати умовам надійності та якості електропостачання, а також мати можливість подальшого розвитку електричних мереж низької напруги.

Отже, аналіз та дослідження конфігурації та режимів роботи систем Microgrid низької напруги на базі енергокомплексів «Активних» будинків та гібридних мобільних електростанцій дозволяє зробити висновки про перспективність подальшого розвитку

© Н. П. Савченко, О. М. Довгалюк, А. В. Трет'як, 2025



Ця робота ліцензується відповідно до **Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)**
Конфлікт інтересів: Автори заявили про відсутність конфлікту

такої технології компоновки сучасних систем електропостачання споживачів.

Аналіз основних досліджень і публікацій. Технологія побудови Microgrid систем вже отримала доволі широкий розвиток та активно впроваджується у багатьох країнах світу. На сьогодні Microgrid вже є енергоефективною ланкою розвинених гібридних енергосистем, що базуються на повній або частковій інтелектуалізації керування електропостачанням споживачів [1].

Microgrid з використанням джерел альтернативної відновлюваної енергії є основою систем розосередженої генерації, що вже активно працюють на різних рівнях енергосистем. Подальший розвиток мікромережових технологій на ряду з розвитком інтелектуальних та інформаційних систем обумовлений їх перевагами у питаннях енергоефективності процесів генерації, зберігання, розподілу та управління електричною енергією. Але постійне удосконалення технічних можливостей складових системи Microgrid спонукає вітчизняних та закордонних винахідників і дослідників й надалі досліджувати режими роботи Microgrid.

Тому на сьогоднішнім основним питанням досліджень є аналіз та розробка енергоефективної структури Microgrid, її склад, організація керування потоками електричної енергії та можливість економічно доцільної технічної реалізації, що відображено та розглядається у наукових роботах Загальний огляд концепції Microgrid, їх класифікація та наявні стратегії їх управління із застосуванням сучасних технологій розглянуті авторами [1–3]. Питанням особливостей впровадження та адаптації Microgrid до поточних умов функціонування енергетичних систем присвячені дослідження низки вітчизняних і закордонних вчених [4–7]. Значна увага приділяється розробці структури Microgrid, яка відповідає вимогам споживачів та дає можливість гнучко адаптуватись до зміни режимів генерування використовуваних ВДЕ та енергосистеми [8–12]. Дослідження різних методів оптимізації в системах управління енергією Microgrid, які забезпечують досягнення високого рівня надійності та експлуатаційної ефективності, присвячені дослідженням [13–16].

Розвиток та активне впровадження інтелектуальних та інформаційних систем сприяли активізації досліджень з метою удосконалення рішень щодо будови та керування режимами систем Microgrid для забезпечення більш ефективних показників їх роботи. Так, автори роботи [17] приділили увагу аналізу заходів для підвищення продуктивності функціонування гібридної Microgrid системи з відновлюваними джерелами енергії (ВДЕ), які формуються в певну стратегію координування взаємодію між різними джерелами енергії та навантаженнями. У дослідженнях [18, 19] розглядаються питання застосування технологій Smart Grid та технічних засобів для максимізації продуктивності автономних Microgrid систем з гібридними джерелами живлення.

Ще одним важливим напрямком є дослідження саме автономних систем Microgrid, що на сьогодні є фактично показником енергонезалежності та надійності енергозабезпечення споживачів [20, 21].

Проведений аналіз робіт стосовно досліджень організації Microgrid показав, що більша їх частина має класичну гібридну структуру, які складаються з традиційних джерел електроенергії енергосистеми та джерел розосередженої генерації, а також систем зберігання енергії. Перевагою таких систем є забезпечення режимів роботи, як автономного, так і гібридного, разом із загальною електричною мережею. Недоліком такої системи є доволі складна інтеграція джерел відновлюваної енергетики у загальну традиційну електричну мережу при тому, що не завжди така конфігурація є економічно обгрунтованою в умовах неможливості контролю перепадів навантаження споживачів Microgrid.

Тому дослідження стосовно удосконалення структурної організації Microgrid на сьогодні є досить важливим та актуальним питанням, що потребує нетривіальних підходів та рішень.

Мета статті. Метою роботи є розробка та обгрунтування структурної організації автономної локальної Microgrid системи для побутових споживачів на основі застосування сучасних енергоефективних технологій з джерелами альтернативної енергетики.

Основний матеріал дослідження.

Енергоефективність та надійність електропостачання є важливими факторами для побутових споживачів особливо у сучасних умовах енергетичної кризи, тому впровадження локальних автономних Microgrid систем є перспективним рішенням, що також підкріплюється екологічними аспектами цієї технології.

Автономні Microgrid системи у подальшому можуть об'єднуватись у Smart Grid системи та формувати зовсім нову футуристичну енергосистему, що повністю відрізняється від існуючої традиційної енергосистеми. Особливістю нової системи є її повна децентралізація, інтелектуалізація та острівний принцип структурної організації.

Принцип побудови класичних Microgrid базується на застосуванні елементів розосередженої генерації, а саме джерел відновлюваної енергетики, системи накопичення енергії, цифрових підстанцій, інтелектуальних регуляторів потоків електроенергії та зовнішньої енергосистеми. Таким чином, сучасна Microgrid система вже є високотехнологічним енергетичним осередком, що дозволяє швидко реагувати на виникнення перевантажень та різкої зміни напруги з метою їх стабілізації.

Подальший розвиток мікромережових технологій здебільшого є прогресивним вдосконаленням її складу та залученням новітніх розробок зі сфери інших енергоефективних технологій енергетичної галузі.

Однією з таких перспективних технологій є концепція побудови «Активних» будинків. Основою цієї концепції є:

- енергозберігання, яке базується на використанні енергоефективних технологій і

природних ресурсів та відновлювальних джерел енергії;

- здоровий мікроклімат, що забезпечується зовнішнім природним середовищем та повною автоматизацією систем життєзабезпечення для організації умов комфортного проживання;

- екологічність оточуючого середовища, яке забезпечується ефективним використанням територіально наявних природних ресурсів і екологічно чистих матеріалів з метою зменшення негативного впливу цивілізації на навколишнє довкілля.

Основним принципом побудови «Активних» будинків є екологічність архітектури з метою збереження і ефективного використання енергоресурсів та наявність позитивного енергобалансу. Таким чином, сучасні енергоефективні будинки повинні відповідати стандарту «енергія плюс», тобто «Активний» будинок виробляє енергії більше, ніж потрібно для покриття власних потреб [22–24].

Задля забезпечення повної автономності та високої енергоефективності «Активного» будинку застосовують енергокомплекси на базі відновлюваних джерел альтернативної енергетики, що виробляють як електричну, так і теплову енергію з метою повного покриття навантаження об'єкту [25].

На рис. 1 наведена схемна конфігурація енергокомплексу «Активного» будинку.



Рисунок 1 – Схемна конфігурація гібридного енергокомплексу «Активного» будинку

Така конфігурація для більшості регіонів України є оптимальною, але для практичної реалізації таких проєктів слід враховувати, що кількісний показник кожного виду джерел альтернативної енергетики приймається в залежності від енергетичного потенціалу місцевості розташування «Активного» будинку.

Ємність системи накопичення енергії підбирається індивідуально у кожному випадку з урахуванням прогнозних графіків навантаження та погодних умов місця розташування.

Також слід зазначити, що енергокомплекс оснащений інтелектуальним пристроєм керування енергозабезпеченням та розумним лічильником, що

має можливість рахувати кількість енергії, як спожитої з електричної мережі, так і її надлишки, що віддані у мережу.

Таким чином, так як «Активний» будинок проєктується завжди з позитивним енергобалансом, то взагалі у вигляді єдиного об'єкту може виступати у ролі джерела розосередженої генерації у Microgrid системі.

Впровадження Microgrid систем такої організаційної структури, коли споживач одночасно є і джерелом розосередженої генерації, дає низку переваг, а саме [26]:

1. реалізація автономної енергосистеми з енергокомплексів «Активних» будинків невеликих розмірів за протяжністю та за потужністю, без додаткового спорудження електростанцій на основі альтернативної енергетики;

- 2) напруга генерації є напругою і споживача, і Microgrid, що дає можливість не застосовувати пристрої перетворення та трансформації;

- 3) система накопичення енергії є розосередженою безпосередньо у кожного споживача, що спрощує структуру Microgrid систем, її реалізацію та алгоритм керування потоками потужності та електроенергії.

На рис. 2. наведена Microgrid система з розосередженою генерацією та споживачами одночасно у вигляді енергокомплексів «Активних» будинків.

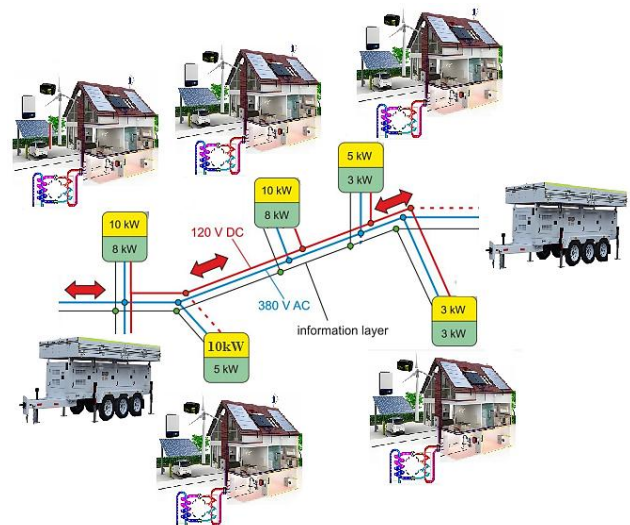


Рисунок 2 – Microgrid система з розосередженою генерацією від енергокомплексів «Активних» будинків

Додатково для збільшення потужності такої Microgrid передбачається підключення гібридних мобільних електростанцій, які можуть швидко переміщуватися та підключатися у різних точках системи, що також дає можливість регулювання потоків потужності.

Розроблена Microgrid повністю забезпечить високі показники надійності енергопостачання та показники якості електричної енергії.

Ефективність таких Microgrid систем скрадатиметься з енергоефективності окремих

об'єктів, тобто енергокомплексів «Активних» будинків та гібридних мобільних електростанцій.

Ефективність окремого енергокомплекса або гібридної мобільної електростанції можна представити у вигляді математичної залежності:

$$E_c = f[kN_1; kN_2; C_{AB(i)}; CB_j; BP], \quad (1)$$

де E_c – головний показник повної ефективності комплексної системи з ВДЕ;

k – сукупність зовнішніх факторів впливу на роботу ВДЕ;

N_1 – тип комплексної системи ВДЕ за класифікацією в залежності від частки заміщення потужності;

N_2 – тип комплексної системи в залежності від кількості видів ВДЕ у системі;

$C_{AB(i)}$ – ємність системи накопичення об'єкта;

CB_j – собівартість генерації однієї кВт×год електроенергії, що отримана різними видами ВДЕ;

BP – вартість одного кВт величини встановленої потужності, отриманої від різних видів ВДЕ.

Тоді ефективність Microgrid системи у математичному описі матиме вигляд:

$$E_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n E_{Ai} + \sum_{j=1}^m E_{Mj}, \quad (2)$$

де E_{Σ} – головний показник повної ефективності Microgrid системи;

$\sum_{i=1}^n E_{Ai}$ – підсумковий головний показник повної

ефективності енергокомплексів «Активних» будинків;

$\sum_{j=1}^m E_{Mj}$ – підсумковий головний показник повної

ефективності гібридних мобільних електростанцій.

Алгоритм інтелектуального керування запропонованою Microgrid фактично буде зведений до скерованого обміну енергією між окремими об'єктами системи.

Висновки. У результаті теоретичного дослідження доведено, що застосування енергоефективних технологій енергокомплексів «Активних» будинків, які одночасно є і споживачами, і джерелами розосередженої генерації, та гібридних мобільних електростанцій є новим витком у розвитку автономних Microgrid систем, що забезпечують стабільне, надійне та якісне електропостачання об'єктів на визначеній території. Також була запропонована математична модель визначення ефективності як окремого енергокомплекса або гібридної мобільної електростанції, так і Microgrid системи в цілому, що потребує подальших досліджень.

Список літератури

- Uddin M., Mo H., Dong D., Elsayah S., Zhu J., Guerrero J. M. Microgrids: A review, outstanding issues and future trends. *Energy Strategy Reviews*. 2023. Vol. 49. 101127. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.esr.2023.101127>.

- Hirsch A., Parag Y., Guerrero J. Microgrids: A review of technologies, key drivers, and outstanding issues. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018. Vol. 90. P. 402–411. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.040>.
- Кириленко О. В., Денисюк С. П. Сучасні тенденції побудови та керування режимами електроенергетичних мереж. *Енергозбереження. Енергетика. Енергоаудит*. 2016. № 4(147). С. 2–14.
- Сценарії використання мікромереж згідно з міжнародними стандартами / І. В. Блінов та ін. *Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України*. 2025. № 70. С. 14–25. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2025.70.014>.
- Interoperability in microgrids to improve energy access: a systematic review / A. Suryani et al. *IEEE Access*. 2024. Vol. 12. P. 64267–64284. DOI: <https://doi.org/10.1109/access.2024.3396275>.
- Almihat M., Munda J. Comprehensive review on challenges of integration of renewable energy systems into microgrid. *Solar Energy and Sustainable Development Journal*. 2025. Vol. 14, no. 1. P. 199–236. DOI: <https://doi.org/10.51646/jesd.v14i1.382>.
- Грищенко А. А., Липов В. В. Організаційні засади функціонування мікромереж ВДЕ: інтегративний підхід. *Відновлювана енергетика*. 2024. № 3(78). С. 6–16. DOI: [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.3\(78\).6-16](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.3(78).6-16).
- The design and application of microgrid supervisory system for commercial buildings considering dynamic converter efficiency / W. Bai et al. *Sustainability*. 2023. Vol. 15, no. 8. 6413. DOI: <https://doi.org/10.3390/su15086413>.
- Савченко Н. П., Довгалюк О. М. Принципи формування оптимальної структури електроенергетичної системи з комплексним використанням джерел розосередженої генерації. *Енергозбереження. Енергетика. Енергоаудит*. 2023. № 9–10 (187–188). С. 36–53. DOI: <https://doi.org/10.20998/2313-8890.2023.09.02>.
- Класичні мікромережі | Управління мікромережею на основі IoT. *KTS-INTEK*. URL: <https://kts-intek.com/smart-energy-2/microgrid/> (дата звернення: 15.05.2025).
- Качан Ю. Г., Шрам О. А. Щодо структури енергоефективної електромережі промислового підприємства з джерелами розосередженої генерації. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2024. № 4 (175). С. 54–59. DOI: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2024-175-4-54-59>.
- Development of energy management system for micro grid operation / S. Jayaprakash et al. *Computer Systems Science and Engineering*. 2023. Vol. 45, no. 3. P. 2537–2551. DOI: <https://doi.org/10.32604/csse.2023.032038>.
- Role of optimization techniques in microgrid energy management systems—A review / G. S. Thirunavukkarasu et al. *Energy Strategy Reviews*. 2022. Vol. 43. 100899. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.esr.2022.100899>.
- General approach to electrical microgrids: optimization, efficiency, and reliability / M. D. C. Toledo-Pérez et al. *Electricity*. 2025. Vol. 6, no. 1. 12. DOI: <https://doi.org/10.3390/electricity6010012>.
- Довгалюк О. М., Савченко Н. П., Трет'як А. В. Інтелектуальне управління в локальних електричних мережах. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я*: тези доповідей XXXII міжнародної науково-практичної конференції MicroCAD-2024, м. Харків, 22–24 трав. 2024 р. Харків, 2024. С. 110.
- Федосєєнко О. М. Керування та управління мікромережевими кластерами: розвиток та майбутні дослідження. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: *Енергетика: надійність та енергоефективність*. 2023. № 2(7). P. 66–71. DOI: <https://doi.org/10.20998/2224-0349.2023.02.02>.
- Ndeke C. B., Adonis M., Almaktoof A. Energy management strategy for a hybrid micro-grid system using renewable energy. *Discov Energy*. 2024. Vol. 4. 1. DOI: <https://doi.org/10.1007/s43937-024-00025-9>.
- Савченко Н., Довгалюк О., Косиченко О. Новітні технології в автономному електропостачанні об'єктів. *V International Scientific and Practical Conference «SCIENTIFIC PRACTICE: MODERN AND CLASSICAL RESEARCH METHODS»*, м. Boston, USA, 22 груд. 2023 р. Boston-Vinnitsia, 2023. С. 164–165. DOI: <https://doi.org/10.36074/logos-22.12.2023.045>.
- Maximizing hybrid microgrid system performance: a comparative analysis and optimization using a gradient pelican algorithm / H. Abd

- El-Sattar et al. *Renewable Energy*. 2024. Vol. 227. 120480. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.120480>.
20. Опришко В. П. Регулювання режимів електропостачання в локальних системах microgrid. *Технічна електродинаміка*. 2016. № 4. С. 77–79. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2016.04.077>
 21. Features of smart grid technologies introduction in the energy industry / V. Y. Lobodzinskiy та ін. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2022. Т. 33(72), № 4. С. 160–166. DOI: <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.4/24>.
 22. Савченко Н. П. Оптимізація комплексних гібридних систем енергопостачання з метою забезпечення принципів «Активного» будинку. *VI Міжнародна науково-технічна конференція «Енергоефективність та енергетична безпека електроенергетичних систем (EEES-2022)»*: Збірник наукових праць, м. Харків, 20–23 груд. 2022 р. Харків, 2022. С. 71–72.
 23. Вілінська Л. М., Бурлак Г. М., Гурська А. В. Енергоефективність багатоквартирного житлового будинку. *Український журнал будівництва та архітектури*. № 3(015). 2023. С. 28–33. DOI: <https://doi.org/10.30838/J.BPSACEA.2312.140723.28.951>.
 24. Taki A., Alsheglawi B. Toward energy-efficient houses considering social cultural needs in bahrain: a new framework approach. *Sustainability*. 2022. Vol. 14, no. 11. 6842. DOI: <https://doi.org/10.3390/su14116842>.
 25. Савченко Н. П., Трет'як А. В., Довгалюк О. М. Перспективи застосування мобільних електростанцій як джерел розосередженої генерації у локальних електричних мережах. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2023. Т. 4, № 74. С. 63–66. DOI: <https://doi.org/10.26906/sunz.2023.4.063>.
 26. Савченко Н. П., Довгалюк О. М. Енергоефективна Мікрогрід система з розосередженою генерацією від енергокомплексів «Активних» будинків. *VIII International Scientific and Practical Conference «EDUCATION AND SCIENCE OF TODAY: INTERSECTORAL ISSUES AND DEVELOPMENT OF SCIENCES»*, м. Cambridge, 9 трав. 2025 р. Cambridge-Vinnitsia, 2025. С. 280–286. DOI: <https://doi.org/10.36074/logos-09.05.2025.057>.
- ### References
1. M. Uddin, H. Mo, D. Dong, S. Elsayah, J. Zhu, and J. M. Guerrero, “Microgrids: A review, outstanding issues and future trends”, *Energy Strategy Reviews*, vol. 49, Sep. 2023, Art. no. 1011276 doi: <https://doi.org/10.1016/j.esr.2023.101127>
 2. A. Hirsch, Y. Parag, and J. Guerrero, “Microgrids: A review of technologies, key drivers, and outstanding issues”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 90, pp. 402–411, Jul. 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.040>
 3. A. V. Kirilenko and S. P. Denisyuk, “Modern tendencies of construction and management modes of electroenergy networks”, *Energy Saving. Power Engineering. Energy Audit*, no. 4(147), pp. 2–14, 2016. (in Ukrainian)
 4. I. Blinov, S. Palachov, E. Parus, and O. Klymenko, “Use cases of microgrids according to international standards”, *Proceedings of the Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine*, vol. 2025, no. 70, pp. 14–25, Apr. 2025, doi: <https://doi.org/10.15407/publishing2025.70.014> (in Ukrainian)
 5. A. Suryani, I. Sulaeman, O. A. Rosyid, N. Moonen, and J. Popović, “Interoperability in microgrids to improve energy access: A systematic review”, *IEEE Access*, vol. 12, pp. 64267–64284, 2024, doi: <https://doi.org/10.1109/access.2024.3396275>
 6. M. Almihat and J. Munda, “Comprehensive review on challenges of integration of renewable energy systems into microgrid”, *Solar Energy and Sustainable Development Journal*, vol. 14, no. 1, pp. 199–236, Mar. 2025, doi: <https://doi.org/10.51646/jesed.v14i1.382>
 7. A. A. Hrytsenko and V. V. Lypov, “Organizational principles of the operation of REG microgrids”, *Vidnovluyana Energetika*, no. 3(78), pp. 6–16, Sep. 2024, doi: [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.3\(78\).6-16](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.3(78).6-16) (in Ukrainian)
 8. W. Bai et al., “The design and application of microgrid supervisory system for commercial buildings considering dynamic converter efficiency”, *Sustainability*, vol. 15, no. 8, Apr. 2023, Art. no. 6413, doi: <https://doi.org/10.3390/su15086413>
 9. N. Savchenko and O. Dovgaluk, “Principles of forming the optimal structure of the electric power system with the integrated use of distributed generation sources”, *Energy Saving. Power Engineering. Energy Audit*, no. 9-10(187-188), pp. 36–53, Feb. 2024, doi: <https://doi.org/10.20998/2313-8890.2023.09.02> (in Ukrainian)
 10. “Smart energy solutions with microgrid systems.” KTS-INTEK. Accessed: May 15, 2025. [Online]. Available: <https://kts-intek.com/smart-energy-2/microgrid/>
 11. Yu. G. Kachan and O. A. Shram, “On the structure of energy-efficient power grid of an industrial enterprise with distributed generation sources”, *Visnyk of Vinnytsia Politechnical Institute*, no. 4 (175), pp. 54–59, 2024, doi: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2024-175-4-54-59> (in Ukrainian)
 12. S. Jayaprakash, B. Gopi, M. Gopal Raj, S. Sujith, S. Deepa, and S. Swapna, “Development of energy management system for micro grid operation”, *Computer Systems Science and Engineering*, vol. 45, no. 3, pp. 2537–2551, 2023, doi: <https://doi.org/10.32604/csse.2023.032038>
 13. G. S. Thirunavukkarasu, M. Seyedmahmoudian, E. Jamei, B. Horan, S. Mekhilef, and A. Stojcevski, “Role of optimization techniques in microgrid energy management systems—A review”, *Energy Strategy Reviews*, vol. 43, Sep. 2022, Art. no. 100899, doi: <https://doi.org/10.1016/j.esr.2022.100899>
 14. M. D. C. Toledo-Pérez et al., “General approach to electrical microgrids: Optimization, efficiency, and reliability”, *Electricity*, vol. 6, no. 1, Mar. 2025, Art. no. 12, doi: <https://doi.org/10.3390/electricity6010012>
 15. O. M. Dovhaliuk, N. P. Savchenko, and A. V. Tretiak, “Intelektualne upravlinnia v lokalnykh elektrychnykh merezhakh [Intelligent control in local electrical networks]”, in *Information technologies: science, engineering, technology, education, health*, Kharkiv, Ukraine, May 22–24, 2024. Kharkiv: NTU «KhPI», 2024, p. 110. (in Ukrainian)
 16. O. Fedoseienko, “Control and management of microgrid clusters: Development and future research”, *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Energy: Reliability and Energy Efficiency*, no. 2 (7), pp. 66–71, Dec. 2023, doi: <https://doi.org/10.20998/2224-0349.2023.02.02> (in Ukrainian)
 17. C. B. Ndeke, M. Adonis, and A. Almaktoof, “Energy management strategy for a hybrid micro-grid system using renewable energy”, *Discover Energy*, vol. 4, Feb. 2024, Art. no. 1, doi: <https://doi.org/10.1007/s43937-024-00025-9>
 18. N. Savchenko, O. Dovhaliuk, O. Kosyuchenko, “Novitni tekhnologii v avtonomnomu elektropostachanni ob'ektiv [The latest technologies in autonomous power supply for facilities]”, in *V International Scientific and Practical Conference «SCIENTIFIC PRACTICE: MODERN AND CLASSICAL RESEARCH METHODS»*, Boston, USA, Dec. 22, 2023. Boston-Vinnitsia: Primedia eLaunch & Eur. Scientific Platform, 2023, pp. 164–165, doi: <https://doi.org/10.36074/logos-22.12.2023.045> (in Ukrainian)
 19. H. Abd El-Sattar, M. H. Hassan, D. Vera, F. Jurado, and S. Kamel, “Maximizing hybrid microgrid system performance: A comparative analysis and optimization using a gradient pelican algorithm”, *Renewable Energy*, vol. 227, Apr. 2024, Art. no. 120480, doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.120480>
 20. V. P. Opryshko, “Power supply mode control in the local microgrid system”, *Tekhnichna Elektrodynamika*, vol. 2016, no. 4, pp. 77–79, Jun. 2016, doi: <https://doi.org/10.15407/techned2016.04.077>
 21. V. Y. Lobodzinskiy, M. P. Buryk, L. Y. Spinul, V. I. Chybelis, and O. A. Illina, “Features of smart grid technologies introduction in the energy industry”, *Scientific Notes of Taurida National V.I. Vernadsky University. Series: Technical Sciences*, vol. 33(72), no. 4, pp. 160–166, 2022, doi: <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.4/24>
 22. N. P. Savchenko, “Optimizatsiia kompleksnykh hibrydnykh system enerhopostachannia z metoiu zabezpechennia prynstypiv «Aktivnoho» budynku [Optimisation of complex hybrid energy supply systems to ensure the principles of an 'active' house]”, in *V International Scientific and Technical Conference «Energy Efficiency and Energy Security of Electric Power Systems (EEES-2022)»*, Kharkiv, Ukraine, Dec. 20–23, 2022. Kharkiv: Madr. Print. House, 2022, pp. 71–72. (in Ukrainian)
 23. L. M. Vilinska, H. M. Burlak, and A. V. Gurska, “Energy efficiency of an apartment building”, *Ukrainian Journal of Civil Engineering and Architecture*, no. 3 (015), pp. 28–33, Jun. 2023, doi: <https://doi.org/10.30838/j.bpsacea.2312.140723.28.951> (in Ukrainian)
 24. A. Taki and B. Alsheglawi, “Toward energy-efficient houses considering social cultural needs in bahrain: A new framework approach”, *Sustainability*, vol. 14, no. 11, Jun. 2022, Art. no. 6842, doi: <https://doi.org/10.3390/su14116842>

25. N. Savchenko, A. Tretiak, and O. Dovgalyuk, "Perspectives of application of mobile power plants as sources of distributed generation in local electrical networks", *Control, Navigation and Communication Systems*, vol. 4, no. 74, pp. 63–66, Dec. 2023, doi: <https://doi.org/10.26906/sunz.2023.4.063> (in Ukrainian)
26. N. P. Savchenko and O. M. Dovhaliuk, "Enerhoefektyvna Mikrohid systema z rozoseredzhenoiu heneratsiieiu vid enerhokompleksiv «Aktyvnykh» budynkiv [Energy-efficient microgrid system with distributed generation from energy complexes of "Active"

buildings]", in *VIII International Scientific and Practical Conference «EDUCATION AND SCIENCE OF TODAY: INTERSECTORAL ISSUES AND DEVELOPMENT OF SCIENCES»*, Cambridge, UK, May 9, 2025. Cambridge-Vinnitsia: P.C. Publ. House & UKRLOGOS Group LLC, 2025, pp. 280–286, doi: <https://doi.org/10.36074/logos-09.05.2025.057> (in Ukrainian)

Надійшла (received) 07.06.2025

UDC 621.311

NATALIA SAVCHENKO – Candidate of Technical Sciences (PhD), Docent, Associate Professor of the Department of Mechatronics and Electrical Engineering, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute"; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7046-0633>; e-mail: natali_a_savchenko@ukr.net.

OKSANA DOVGALYUK ✉ – Candidate of Technical Sciences (PhD), Docent, Professor of the Department of Electric Power Transmission, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1994-619X>; e-mail: Oksana.Dovhaliuk@kpi.edu.ua.

ANDRII TRETIK – Candidate of Technical Sciences (PhD), Associate Professor of the Department of Automation, Electronics and Telecommunications, National University "Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic"; Poltava, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3971-3078>; e-mail: tretjak_a.v@ukr.net.

AUTONOMOUS MICROGRID SYSTEM FOR DOMESTIC CONSUMERS BASED ON ENERGY-EFFICIENT TECHNOLOGIES WITH RENEWABLE ENERGY SOURCES

In the context of the global energy crisis, there is a growing need to update the concept and principles of energy system organisation, as well as approaches to their management. Traditional energy and centralised energy system management currently do not fully ensure the quality and reliability of electricity supply to consumers. The limited amount of traditional energy resources, the low level of modernisation and automation of energy system components, and the constant destruction of energy facilities as a result of military actions in Ukraine are the primary problems in the energy sector that need to be solved as soon as possible. The introduction of energy-efficient alternative energy technologies and the organisation of energy supply in the form of microgrid systems with distributed generation and decentralised control can be an effective solution to issues related to energy supply to consumers, especially in the domestic sector. Microgrids, by their very nature, are based on the complete intellectualisation of the management of the processes of generation, distribution, consumption and conservation of electrical energy, which ensures a closed cycle in the energy system with the organisation of power flows according to an effective control algorithm. The article proposes the organisation of an autonomous microgrid system using energy complexes of 'active' houses and mobile hybrid power stations as sources of distributed generation for additional generation and changes in the network structure. To improve the efficiency of the developed microgrid for domestic consumers, an algorithm for managing energy resources in it is proposed. The results obtained show the feasibility and energy efficiency of the developed MicroGrid system for domestic consumers. Conclusions have been made regarding the prospects for the further development of microgrids in the direction of using all the technical capabilities of renewable energy to overcome the energy crisis in the country and achieve energy independence.

Keywords: electricity grid; microgrid; renewable energy source; distributed generation; hybrid mobile power plant; energy complex; "Active" house; operating mode; intelligent control; energy efficiency.

СКРИПНИК РОСТИСЛАВ ЯРОСЛАВОВИЧ ✉ – аспірант кафедри передачі електричної енергії, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-7038-631X>; e-mail: rostyslav.skrypnyk@ieec.khpi.edu.ua.

ГРИЦЕНКО ВЛАДИСЛАВ ВІТАЛІЙОВИЧ – асистент кафедри електричних станцій, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4499-0603>; e-mail: vladyslav.hrytsenko@khpi.edu.ua.

ЗАСТОСУВАННЯ АЛГОРИТМІВ КЕРУВАННЯ СИСТЕМАМИ НАКОПИЧЕННЯ ЕНЕРГІЇ ІНТЕГРОВАНІХ В СИСТЕМИ З ВЕЛИКОЮ ЧАСТКОЮ ВІДНОВЛЕНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ

У статті розглянуто актуальні питання забезпечення надійності та стійкості синхронної роботи енергосистеми в умовах стрімкого зростання частки генерації відновлюваних джерел енергії. Зокрема, проаналізовано, як збільшення обсягів генерації від відновлюваних джерел енергії призводить до зниження інерційності енергосистеми, що ускладнює підтримання частоти та балансу потужності в реальному часі. Така ситуація створює нові виклики для операторів систем передачі та розподілу, які змушені адаптувати традиційні підходи до управління режимами роботи мережі. Розглянуто сучасні виклики, пов'язані з інтеграцією відновлюваних джерел енергії в енергосистему, зокрема сонячної та вітрової генерації, які характеризуються високою варіативністю та низькою передбачуваністю. Визначено необхідність впровадження допоміжних системних послуг, таких як регулювання частоти, підтримка напруги та резерви потужності, для забезпечення стабільної роботи мережі в умовах зростаючої децентралізації генерації. Особливу увагу приділено аналізу алгоритмів керування інверторами, які можуть реалізовувати функції віртуальних синхронних машин, імітуючи поведінку традиційних синхронних генераторів. Такий підхід дозволяє забезпечити інерційний відгук, демпфування коливань частоти та синхронізацію з мережею без використання обертових мас. Розглянуто варіанти застосування систем накопичення електроенергії як ключового елементу для компенсації нестабільності відновлюваних джерел енергії. Формалізовано загальний підхід до моделювання та оптимізації використання систем накопичення електроенергії в електричних мережах, з використанням для цього розрахунків за формулами, які враховують характеристики інерції синхронного генератора, регуляторів, систем збудження та моделей ротора. Проведено оцінку ефективності цих моделей для визначення оптимальних режимів роботи з урахуванням змін навантаження, аварійних ситуацій та коливань генерації. Розглянуто можливості спеціалізованого програмного забезпечення на платформі C# (.NET), щодо інтегрування з DigSILENT PowerFactory для проведення розрахунків статичної та динамічної стійкості, а також моделювання електричних мереж напругою 35–750 кВ.

Ключові слова: відновлювані джерела енергії; віртуальна інерція; математичне моделювання; система керування балансом активної потужності; регулювання частоти; інвертор; система накопичення енергії.

Вступ. Значний ріст генерації в останні роки, особливо генерації з відновлених джерел енергії (енергія сонця, вітру, біопаливо тощо, надалі ВДЕ) не забезпечує надійну синхронну роботу енергосистеми, виходячи з цього встановлюється межа для несинхронної роботи генерації, яка пов'язана з ВДЕ та роботою інверторів та інших перетворювачів їхньої енергії [1–3].

Так, наприклад, встановлена межа для несинхронної генерації відносно навантаження в Ірландії становить 65 %, у Техасі – 54 % в максимумі навантаження. Особливий ріст потужності вітрових електростанцій ВЕС зафіксовано на Півдні Австралії та досягає 170% [4, 5].

Таким чином можна спостерігати тенденцію, в якій доля синхронної генерації весь час зменшується, що в свою чергу зменшує інерційність енергосистеми. Разом із позитивними рисами, перш за все такими, як зменшення шкідливих викидів у атмосферу [6, 7] та залучення інвестицій у цей сектор енергетики, зростання частки ВДЕ в загальному балансі об'єднаної електроенергетичної системи (ОЕС) України створює ризики порушення балансової надійності енергосистеми, оскільки електростанції, що працюють на ВДЕ, мають негарантований, змінний графік генерування електричної енергії (ЕЕ) як впродовж доби, так і значні сезонні коливання обсягів виробництва [8]. Подальше зростання частки ВДЕ в

балансі ОЕС України [9] неможливе без збільшення обсягів первинного, вторинного регулювання частоти та потужності, а також резерву заміщення в енергосистемі [10].

Виникає питання щодо системних засобів, які потрібно використати для стійкої та надійної роботи енергосистеми. Ці засоби відносяться до допоміжних системних послуг, які необхідні в структурі роботи енергоринку для сучасної енергосистеми.

Мета статті. Аналіз застосування систем накопичування енергії (СНЕ) в системі з низькою інерцією в режимі віртуальної синхронної машини, що формується за допомогою системи керування інверторів.

Технології накопичення електричної енергії. Інтеграція в енергосистему ВДЕ зі змінною вихідною потужністю перетворила традиційну генерацію електроенергії з керованих і диспетчеризованих ресурсів на некеровані та недиспетчеризовані.

Крім того, стохастична природа навантажень, що поступово ускладнюється появою в їх структурі зарядних станцій електромобілів, робить процес споживання енергії ще більш непередбачуваним. Вважається, що ефективним шляхом вирішення вище перелічених різноманітних проблем, що при цьому можуть виникнути, є впровадження СНЕ.

Але ефективність такого рішення значною мірою залежить від технологій, які моделюють в технологіях



конвертерних систем, закладаючи систему керування ними моделі інерції синхронного генератора, регулятора, системи збудження, моделі ротору з функцією формування мережі, місць розміщення та стратегії управління [3].

Процес експлуатації електричних мереж завжди потребує визначення раціонального співвідношення між генерацією енергії та її споживанням оскільки потрібно постійно контролювати пропозицію в залежності від попиту, тобто дві складові - попит та пропозиція повинні завжди бути максимально точно збалансовані. Попит електроенергії можна приблизно передбачити (вечір – зростання споживання, ніч – зниження), з цього виходить, що електросистеми повинні бути гнучкими. Гнучкість досягається за допомогою системних операторів, які регулюють вихідну потужність в залежності від збільшення або зменшення попиту.

Зберігання енергії можна розділити на 3 етапи:

- забирання електроенергії з мережі;
- зберігання електроенергії;
- повернення електроенергії в електричну мережу через певний час.

В електроенергетиці можуть використовуватись численні технології накопичення енергії, які, зазвичай, поділяються на шість груп: електричні, механічні, електрохімічні, термохімічні, хімічні та теплові. Залежно від форми зберігання та характеристик її видачі в мережу, СНЕ може виконувати безліч функцій на ринку електричної енергії [6].

Функціональні можливості та сфери застосування технологій накопичення енергії залежать від їхніх характеристик. Одна група характеристик визначається номінальними значеннями потужності й енергії. Номінальна потужність характеризує швидкість заряду/розряду, а номінальна енергія відбиває тривалість розряду. Динамічні характеристики оцінюють час відгуку та швидкість лінійної зміни параметрів накопичувача. Час відгуку – це час, протягом якого накопичена енергія переходить зі стану нульового розряду до повного розряду, а швидкість зміни – швидкість, з якої може змінюватися вихідна потужність.

Зрозуміло, що впровадження СНЕ (особливо великомасштабне) потребує значних інвестицій, їхній правильний вибір на основі очікуваного економічного ефекту є складним завданням. Тут необхідно враховувати різні аспекти їх застосування, зокрема, технічні й економічні особливості різних технологій акумулювання енергії, ступінь їх зрілості з погляду комерціалізації, вплив на навколишнє середовище, завдання, які планується вирішувати за рахунок їх застосування. Наводити числові значення зазначених характеристик для різних СНЕ не має сенсу, тому, що наявні в літературі відповідні данні варіюються у занадто широкому діапазоні. Тому у табл. 1 наведено лише загальну інформацію щодо переваг і недоліків окремих технологій накопичення енергії.

Якість електроенергії в електричній мережі визначається, насамперед, як підтримка частоти та

величини напруги в межах допустимого діапазону значень при забезпеченні його синусоїдальної форми.

Таблиця 1 – Переваги та недоліки технології накопичення енергії

Назва технології	Переваги	Недоліки
Електричні		
Конденсатор	Швидкий час відгуку, велика кількість циклів	Висока вартість, довгий життєвий цикл та невисока ефективність
Суперконденсатор	Великий життєвий цикл і висока ефективність	Висока енергетична щільність, окисність
Електромагнітні магнітні накопичувачі (Superconducting Magnetic Energy Storage, SMES)	Велика потужність і висока ефективність, швидкий час відгуку, великий життєвий цикл	Високі витрати на охолодження
Механічні		
Стиснене повітря (Compressed air energy storage, CAES)	Велика потужність, великий життєвий цикл і висока ефективність	Негативний вплив на довкілля через шум та викиди CO ₂
Гравітаційне накопичення	Велика потужність і висока ефективність	Високі витрати на будівництво
Літаючі колеса (Flywheels)	Швидкий час відгуку, велика кількість циклів	Висока вартість, невисока енергетична щільність
Електрохімічні		
Літій-іонні батареї (Li-Ion)	Велика енергетична щільність і високий ККД	Великий термін служби
Нікель-металгідридна батарея (NiMH)	Високий ККД	Великий термін служби
Цинк-бром (ZnBr)	Високий ККД	Великий термін служби
Хімічні		
Паливні комірки	Практично нульовий саморозряд	Потреба в заміні каталізаторів

Остання умова є досить актуальною, оскільки більшість ВДЕ приєднуються до мережі через обладнання силової електроніки, нелінійна вольт-амперна характеристика яких породжує гармоніки в системі. Одночасно наявність нелінійних навантажень, обсяг яких зростає за рахунок появи зарядних пристроїв для електромобілів, також призводить до виникнення гармонік струму та напруги в системі, але вони можуть бути скомпенсовані належним використанням електронних перетворювачів потужності СНЕ, які діють як активний фільтр.

Крім цього, стохастично змінювані навантаження, електроприймачі зі значним споживанням реактивної потужності та перехід від роботи паралельно з енергосистемою до ізольованої роботи є додатковими факторами, які призводять і до таких проблем з якістю електроенергії як коливання потужності, а, відповідно,

і напруги, провалів і стрибків напруги, низькому коефіцієнту потужності.

За таких ситуацій використання традиційних пристроїв регулювання під навантаженням та інших регуляторів напруги може бути неефективним. Тому необхідний інший механізм підтримки відхилень напруги в припустимому діапазоні задля стабільної роботи енергосистеми та електромереж.

Додатково важливо зазначити, що при розгляді питань щодо якості електричної енергії практично відсутні дослідження відносно коливальних перехідних процесів, що є важливим питанням для електричних мереж з ВДЕ, особливо з огляду на можливість формування «острівного» режиму їхньої роботи.

Важливою властивістю СНЕ в системі розподілу електроенергії, зокрема в мікросистемах, є можливість їх використання в якості джерела віртуальної інерції для підвищення стабільності частоти за рахунок компенсації низької інерції ВДЕ [11].

Тобто енергія, що зберігається в СНЕ, ємулює кінетичну енергію, запасену в роторі синхронного генератора, яка може бути вивільнена у разі збурення або різкого дисбалансу між попитом і пропозицією.

Акумуляторні СНЕ, суперконденсатори, надпровідні магнітні накопичувачі енергії та накопичувачі енергії на маховиках завдяки їхній швидкій динаміці є придатними засобами для демпфування коливань частоти в енергосистемі.

Регулювання частоти. Інерція системи визначається як опір змінам частоти системи за рахунок накопичення/введення кінетичної енергії, що надходить від синхронно підключеної машини, що обертається, з системи/у систему під час виникнення дисбалансу потужності.

Кінетична енергія системи E_k розраховується за формулою (1), що має вигляд:

$$E_k = \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{2} J_i \omega_{mi}^2 \right) \quad (1)$$

де J – момент інерції, кг/м²;

ω_{mi} – кутова швидкість ротора i -ї машини, що обертається, рад/с;

n – загальна кількість машин.

Загальна характеристика інерції системи є відношенням загальної накопиченої кінетичної енергії (у МДж) при синхронній швидкості до номінального значення (у МВА) базової системи за формулою (2):

$$H_{sys} = \frac{E_k}{S_{base}} = \frac{\omega_{sm}^2}{2S_{base}} \sum_{i=1}^n J_i \quad (2)$$

де S_{base} – базова характеристика системи, МВА;

ω_{sm} – синхронна швидкість системи, рад/с.

Видно, що загальна інерція системи залежить від кількості машин, що обертаються, об'єднаних у систему, а також кінетичної енергії, що накопичена в їхній обертовій масі. Для порівняння, миттєвий фізичний запас силового перетворювача є енергія, яку

накопичено у його конденсаторі на стороні постійного струму, та вона є незначною у порівнянні з інерцією обертання синхронних машин.

Початкове значення, так званого показника швидкості зміни частоти (англ. Rate-of-Change-of-Frequency, ROCOF), що визначається величиною дисбалансу потужностей та інерцією системи, може бути виражене за формулою (3):

$$ROCOF = \frac{f_0}{2H_{sys}} \cdot \frac{\Delta P}{S_{base}} = \frac{f_0 \Delta P}{2E_k} \quad (3)$$

де ΔP – величина зміни активної потужності;

f_0 – номінальна частота системи.

Виходячи з формули (3) можна визначити, що значення показника ROCOF буде більшим, або при більшому значенні зміни активної потужності, або при меншому значенні енергії, що накопичено в системі. Оскільки на цей час синхронні генератори, що мають велике значенням кінетичної енергії за рахунок обертової маси, зменшують частку в енергетичному міксі через активний розвиток ВДЕ, що мають нульову механічну інерцію, величина сумарних H_{sys} та E_k знижується. Більш того, стохастичний характер відновлюваної генерації викликає частіші та сильні порушення балансу потужності. Комбінація цих двох факторів може призвести до збільшення значення ROCOF і, отже, до погіршення стабільності мережі.

Традиційно відхилення частоти, викликане зміною потужності та позаштатними ситуаціями, компенсується первинним частотним регулюванням (ПЧР), яке має здійснюватися зміною потужності генеруючої одиниці, УЗЕ, одиниці споживання залежно від фактичного відхилення частоти по статичній характеристиці, в основному за рахунок генераторів та системи регулювання турбіни, що обертаються [12].

Однак властива їм зона нечутливості та повільна реакція системи регулювання турбіни, особливо олівного принципу керування роботи механізму, зазвичай призводять до видачі необхідної потужності приблизно через 10–20 с, що є надто повільно для системи з низькою інерцією. За допомогою швидкодіючого джерела енергії, такого як СНЕ з інтерфейсом перетворювача, можна видавати потужність для ефективного пом'якшення коливань частоти та покращення показника ROCOF.

Ряд технологій зберігання енергії, є потенційними кандидатами для надання подібних послуг. Так, наприклад, маховики мають час відгуку менший ніж 4 мс і час розряду до 15 хв, літій-іонні, проточні та свинцево-кислотні батареї мають час відгуку до 40 мс і можуть розряджатися як протягом декількох хвилин, так і декількох годин, суперконденсатори забезпечують час відгуку до 10 мс і тривалість розряду, який здебільше не перевищує однієї години [10].

Послуги з балансування режиму енергосистеми традиційно реалізуються на трьох рівнях відповідно до часових шкал і включають: первинне, вторинне та третинне частотні регулювання. Останнім часом у низці країн, наприклад Австралії та США, через

прагнення зменшити інерцію було розроблено низку нових послуг з регулювання частоти, які характеризуються швидким відгуком на зміну частоти (англ. fast frequency response, FFR) [4, 5].

Зона нечутливості, коефіцієнт спаду, швидкість відгуку та тривалість є основними параметрами при вирішенні питань регулювання частоти. У даний час підвищення точності управління та використання силових перетворювачів (особливо для асинхронних генераторів) може значно зменшити зону нечутливості, у той час як заздалегідь задана зона нечутливості, як і раніше, широко використовується для зменшення зносу обладнання.

З точки зору мережі, більш вузька зона нечутливості та менший коефіцієнт посилення регулювання можуть покращити стабільність частоти електромережі. Однак, з іншого боку, вони можуть викликати надмірне зношування машин, що обертаються, та прискорену деградацію електрохімічних систем акумулювання.

Швидкість відгуку частотної характеристики в основному визначається часовою затримкою T_{delay} та швидкістю наростання K_p потужності. Висока швидкість наростання має велике значення для корисності послуги регулювання частоти, отже, системи накопичення енергії, пов'язані з перетворювачем потужності, є придатними засобом реалізації послуги FFR.

Для знаходження обґрунтованого та сталого вирішення проблеми оптимального вибору СНЕ у електричних мережах з інтегрованими до неї ВДЕ, під час моделювання необхідно враховувати невизначеність навантажень і генерації з боку ВДЕ. В переважній більшості випадків для цієї мети застосовувалися методи, у тій чи іншій формі, орієнтовані на використання ймовірнісних методів.

Вибір оптимальних місць розміщення та параметрів СНЕ у електричних мережах є непростим завданням у математичному сенсі, з використанням різних методів оптимізації: класичних, аналітичних та метаевристичних. Хоча ці підходи до оптимізації мають певні недоліки, обмеження для енергосистем із високою розмірністю зокрема, метод лінійного програмування відносно легко реалізувати, але зазвичай важко уявити адекватні моделі, які відповідають завданню, що розглядається, у вигляді набору лінійних рівнянь [13].

Крім цього значні значення струмів коротких замикань (КЗ), співвідношення їхніх рівнів та видів вимагають високу стійкість енергосистем, враховуючи фазове підстроювання частоти для генераторів, робота та регулювання яких залежать від мережі. Так діючі сонячні електростанції в деяких випадках при технологічних порушеннях в мережах можуть не відновити роботу в мережах з низьким значенням стійкості, вони будуть мати можливість не успішно включитися, видаючи тільки кидки напруги в мережу до якою будуть підключатися генератори.

Дефіцит стійкості в енергосистемі заважає ресинхронізації генераторів з мережею та приводить до їх вимкнення в таких випадках, а в подальшому до

розвитку технологічного порушення з приведенням до складної системної аварії.

Інвертори, які формують мережу, не потребують фазової підстроювання частоти – вони генерують свою форму напруги.

У віртуальній синхронній машині, яку моделює в технологіях конверторних систем, закладається модель інерції синхронного генератора, регулятора, системи збудження, модель ротору.

Враховуючи вищезазначені виникають актуальні питання щодо забезпечення надійності та стійкості синхронної роботи енергосистеми в умовах роботи з зростаючої частки генерації з відновлюваних джерел енергії. Один з перших більш масштабними за обсягами потужностями та використаними технологічними системами був впроваджений в експлуатацію 14 грудня 2018 році, проект ESCRI-SA, якій першим масштабним проектом СНЕ великої потужності Австралії, потужність акумуляторів накопичувачів (інноваційна система збереження енергії Dalrymple потужністю 30 МВт, 8 МВт-год), які працюють в режимі віртуального синхронного генератора с функцією формування мережі (grid-forming) [4, 5].

Перевагами цього впровадження є:

- віртуальна інерція та підвищення стійкості за напругою за рахунок високої швидкодії роботи інверторів напруги;
- стійкість системи за рахунок забезпечення струму КЗ під час пошкоджень в мережі забезпечується видача струму КЗ від нього, який і підвищує ступінь стійкості роботи енергосистеми.
- Властива зона нечутливості ПЧР та повільна реакція призводять до видачі необхідної потужності приблизно через 10–20 с, що є надто повільно для системи з низькою інерцією. За допомогою швидкодіючого джерела енергії, такого як СНЕ з інтерфейсом перетворювача, можна видавати потужність з ефективною стабілізацією коливань частоти, скорочуючи час коливань частоти та потужності до 40 мс. ПЧР – це безпосередньо швидкість роботи регуляторів (регулюючих клапанів) турбіні та інерція синхронного генератору.

Моделювання віртуальної інерції. Математичне моделювання при розробленні алгоритмів керування сучасних інверторів або перетворювачів систем накопичення з функціями віртуальних синхронних машин по своїй структурі буде виглядати, як імітаційне моделювання, яке передбачає подання моделі у вигляді алгоритму та комп'ютерної програми, яка дозволить відтворити поведінку об'єкта, а саме віртуального синхронного генератору (BSG).

Динаміку BSG можна представити системою диференціальних рівнянь. Умовно їх можна розділити на такі частини:

- електромеханічні рівняння динаміки ротора;
- електромагнітна система на основі системи рівнянь Парка;
- рівняння визначення віртуальної інерції;

• рівняння визначення віртуального коефіцієнта демпфування [14].

Відповідні математичні вирази представлені у формулах (4–7):

$$\frac{d\theta}{d\tau} = \frac{1}{2H_{VSM}}(T_m - T_e - F_{VSM}) \quad (4)$$

де θ – кут ротора;

H_{VSM} – величина віртуальної інерції;

T_m – механічний момент;

T_e – електромагнітний момент;

F_{VSM} – момент демпфування ВСГ.

$$\begin{cases} \frac{d\Psi_d}{d\tau} = \omega_N u_d + \omega \Psi_q - \omega_N R_s i_d \\ \frac{d\Psi_q}{d\tau} = \omega_N u_q + \omega \Psi_d - \omega_N R_s i_q \\ \frac{d\Psi_{kd}}{d\tau} = \omega_N u_{kd} - \omega_N R_{kd} i_{kd} \\ \frac{d\Psi_{kq}}{d\tau} = \omega_N u_{kq} - \omega_N R_{kq} i_{kq} \\ \frac{d\Psi_f}{d\tau} = \omega_N \Psi_f - \omega_N R_f i_f \end{cases} \quad (5)$$

де Ψ_d, Ψ_q – потік зчеплення по d- та q-осі;

u_d, u_q – напруга по d- та q-осі (керовані інвертором);

ω_N – номінальна частота системи;

$\omega \Psi_d, \omega \Psi_q$ – електромагнітна взаємодія з d- та q-віссю;

R_s – активний опір обмотки статора;

i_d, i_q – струм по d- та q-осі;

Ψ_{kd}, Ψ_{kq} – потік у демпферній обмотці d- та q-осі;

u_{kd}, u_{kq} – напруга на демпферній обмотці d- та q-осі;

R_{kd}, R_{kq} – активний опір демпферних обмоток;

i_{kd}, i_{kq} – струм у демпферній обмотці d- та q-осі;

Ψ_f – потік зчеплення в обмотці збудження;

R_f – активний опір обмотки збудження;

i_f – струм збудження (керовані інвертором).

$$H_{VSM} = \frac{U_f U}{2X_f S_{VSM} \omega_n} \quad (6)$$

де U_f – модуль напруги збудження ВСГ;

U – вихідна напруга інвертора;

X_f – індуктивний опір обмотки збудження;

S_{VSM} – номінальна потужність ВСГ.

$$D_{VSM} = 2\zeta \omega_n M_{VSM} \quad (7)$$

де ζ – коефіцієнт демпфування;

M_{VSM} – еквівалентна інерція ВСГ.

Імітаційна модель також може розглядати як експерименти, що проводяться на комп'ютерах з математичними моделями, які імітують поведінку реальних синхронних генераторів. При цьому імітуються елементарні явища, що складають процес, зі збереженням їх логічної структури та послідовності

у часі, що дозволяє отримати відомості про стан системи у певний момент часу та оцінити характеристики системи та реакції синхронного генератору на різні збурення та режими, які виникають в мережі до якої під'єднаний один або кілька генераторів. Імітаційні моделі дозволяють вирішувати більш складні задачі, ніж аналітичні. Наприклад, вони дозволяють досить легко враховувати вплив випадкових факторів, які можливо ускладнять в обрахунку ці імітаційні моделі, які будуть вирішуватися за допомогою комп'ютерної моделі.

Комп'ютерні моделі такого типу це окрема програма, сукупність програм чи програмний комплекс, що дасть змогу виконанням послідовності обчислень з подальшим графічним відображенням їх результатів відтворюванням (імітуванням) процесів функціонування об'єкта (системи об'єктів), що функціонують під впливом різних, як правило, випадкових, факторів. В нашому випадку будемо використовувати програму C# (.Net) компанії Microsoft, тому що, це потужна та гнучка мова програмування, яка дозволяє використовувати різноманітний набір інструментів та бібліотек для створення різних видів моделей, включаючи імітаційні моделі еквівалентних електричних схем мереж та систем, а також різноманітних режимів їх роботи.

Серед інших переваги імітаційного моделювання з використанням C#:

- можливість повністю контролювати структуру та логіку імітаційної моделі, створюючи власні класи, обробники подій, алгоритми та управляти кожним етапом моделювання;

- C# має широкий вибір сторонніх бібліотек і інструментів, що дозволяють виконувати різні завдання імітаційного моделювання у тому числі різноманітні складні перехідні процеси в енергосистемі, бібліотеки для роботи з випадковими числами, моделювання подій, статистичним аналізом та іншими потрібними функціями;

- легко розширювати функціональність вашої моделі, додаючи нові алгоритми моделей включно з ново побудованими електричними мережами та системами, обробляти події (будь-які технологічні порушення) або інші складові, що можуть бути важко реалізувати у інших спеціалізованих програмах. Інтеграція C# з іншими системами легко інтегрувати імітаційну модель з іншими системами або програмами. Використання C# може бути ефективним рішенням для імітаційного моделювання у випадках, коли потрібна гнучкість, розширюваність і контроль над процесом моделювання;

- інтеграція за допомогою хмарного провайдера Azure Sql Service для збереження технічних характеристик табличному виді, а саме: характеристика інерції системи і синхронних генераторів; регуляторів турбіни; характеристики системи збудження генераторів і технічні характеристики ротора генератора і турбіни.

- імітаційні моделі еквівалентних електричних схем мереж та систем та різноманітних

режимів їх роботи, які написані на C# (.Net) можливо бути інтегроване в програмне забезпечення DIgSILENT PowerFactory.

- програмний комплекс DIgSILENT PowerFactory надає інструментальні можливості використовувати вже наявні, так і створювати власні функціональні блоки. Виконувати розрахунки статичної, динамічної стійкості та оптимізації режимів; еквіваленти діючих мереж класом напруги 35-750кВ, розрахунок зміни частот в системі, модулювання неповнофазних режимів та розрахунки реактивної потужності.

Результати. Зберігання енергії підвищує стабільність електромережі, збільшує можливості інтеграції відновлювальних джерел енергії в систему, підвищує ефективність використання елементів енергомережі, та зменшує використання викопних ресурсів, що позитивно впливає на екологічну складову під час виробництва електроенергії

Розвиток альтернативних типів накопичувачів, потенційно дозволить створювати розгалужену мережу, яка зможе покращити показники стійкості в енергомережах з великою часткою ВДЕ, вирівнюючи наслідки порушення балансу генерації та споживання. Для цього необхідно враховувати особливості роботи таких систем, а саме:

1. Не всі інвертори працюють однаково, внаслідок різних технічних характеристик та закладених математичних моделей та алгоритмів їхнього керування;

2. Інвертори, ведені мережею (особливо при роботі сонячних електростанцій) схильні до проблеми нестійкої роботи в “слабких” електромережах;

3. ПЧР та віртуальна інерція є різними засобами, що мають різні механізми роботи та природу;

4. Впровадження СНЕ з формуванням мережі може забезпечити функціонал, який більш ефективно виконує стабілізацію коливань частоти та потужності, якій раніше не виконувався в цьому напрямку;

5. Модель ВСГ дозволяє відключати традиційні синхронні генератори в мережі без втрати стійкості;

6. Модель ВСГ дозволяє одночасно вирішувати проблеми регулювання в магістральних мережах та отримувати дохід від надання допоміжних послуг на енергоринках;

7. Для рішень підвищення стійкості в мережі інвертори, що використовуються, повинні мати достатню переважувальну здатність.

Список літератури

1. Енергетика України та реалії глобального потепління / О. В. Кириленко та ін. *Технічна електродинаміка*. 2020. Т. 2020, № 3. С. 52–61. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2020.03.052>.
2. Складові моделі для аналізу впливу відновлюваних джерел енергії на ринкову вартість електроенергії в Україні / Г. А. Іванов та ін. *Технічна електродинаміка*. 2020. Т. 2020, № 4. С. 72–75. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2020.04.072>.
3. Main features of the stability and reliability enhancement of electricity grid with DG in Ukraine based on IEEE standards / O. V. Kyrylenko et al. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2013. No. 6. P. 46–50.

4. Sproul S., Cherevatskiy S., Klingenberg H. Grid forming energy storage: provides virtual inertia, interconnects renewables and unlocks revenue. 6 July 2020. URL: https://cigre.es/wp-content/uploads/2020/11/Presentation_Grid-Forming-Energy-Storage.pdf.
5. ElectraNet. ESCRI-SA battery energy storage. Final knowledge sharing report. Adelaide : ElectraNet Pty Limited, 2021. 39 p. URL: <https://arena.gov.au/assets/2021/04/escr-sa-battery-energy-storage-final-report.pdf>.
6. Risk assessment for the population of Kyiv, Ukraine as a result of atmospheric air pollution / O. Popov et al. *Journal of Health and Pollution*. 2020. Vol. 10, no. 25. 200303. DOI: <https://doi.org/10.5696/2156-9614-10.25.200303>.
7. Software tools for tasks of sustainable development of environmental problems: peculiarities of programming and implementation in the specialists' preparation / A. Iatsyshyn et al. *The International Conference on Sustainable Futures: Environmental, Technological, Social and Economic Matters (ICSF 2020)*, Kryvyi Rih, Ukraine, 20–22 May 2020. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016601001>.
8. Lezhniuk P., Komar V., Rubanenko O. Information support for the task of estimation the quality of functioning of the electricity distribution power grids with renewable energy source. *2020 IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems (ESS)*, Kyiv, Ukraine, 12–14 May 2020. 2020. P. 168–171. DOI: <https://doi.org/10.1109/ess50319.2020.9159965>.
9. Zgurovets O., Kulyk M. Comparative analysis and recommendations for the use of frequency regulation technologies in integrated power systems with a large share of wind power plants. *Studies in Systems, Decision and Control*. Cham, 2021. P. 81–99. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-69189-9_5.
10. Кириленко О. В., Блінов І. В., Парус Є. В. Оцінка роботи електростанцій при наданні допоміжних послуг з первинного та вторинного регулювання частоти в ОЕС України. *Технічна електродинаміка*. 2013. № 5. С. 55–60.
11. Lamichhane S., Nazaripouya H., Mehraeen S. Micro grid stability improvements by employing storage. *2013 IEEE Green Technologies Conference (GreenTech 2013)*, Denver, CO, 4–5 April 2013. 2013. P. 250–258. DOI: <https://doi.org/10.1109/greentech.2013.46>.
12. Про затвердження Кодексу системи передачі: Постанова Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг від 14.03.2018 № 309 : станом на 1 черв. 2025 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0309874-18#Text>.
13. Clack C. T. M., Xie Y., MacDonald A. E. Linear programming techniques for developing an optimal electrical system including high-voltage direct-current transmission and storage. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2015. Vol. 68. P. 103–114. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2014.12.049>.
14. Zhong Q.-C., Weiss G. Synchronverters: inverters that mimic synchronous generators. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2011. Vol. 58, no. 4. P. 1259–1267. DOI: <https://doi.org/10.1109/tie.2010.2048839>.

References

1. O. V. Kyrylenko, B. I. Basok, Y. T. Basyev, and I. V. Blinov, “Power industry of Ukraine and realities of the global warming”, *Tekhnichna Elektrodynamika*, vol. 2020, no. 3, pp. 52–61, May 2020, doi: <https://doi.org/10.15407/techned2020.03.052> (in Ukrainian)
2. H. A. Ivanov, I. V. Blinov, E. V. Parus, and V. O. Miroshnyk, “Components of model for analysis of influence of renewables on the electricity market price in Ukraine”, *Tekhnichna Elektrodynamika*, vol. 2020, no. 4, pp. 72–75, Jun. 2020, doi: <https://doi.org/10.15407/techned2020.04.072> (in Ukrainian)
3. O. V. Kyrylenko, R. Strzelecki, S. P. Denysiuk, and D. G. Derevianko, “Main features of the stability and reliability enhancement of electricity grid with DG in Ukraine based on IEEE standards”, *Tekhnichna Elektrodynamika*, no. 6, pp. 46–50, 2013.
4. S. Sproul, S. Cherevatskiy, and H. Klingenberg, “Grid forming energy storage: Provides virtual inertia, interconnects renewables and unlocks revenue”, in Jul. 6, 2020. [Online]. Available: https://cigre.es/wp-content/uploads/2020/11/Presentation_Grid-Forming-Energy-Storage.pdf

5. ElectraNet, "ESCRI-SA battery energy storage. Final knowledge sharing report", ElectraNet Pty Limited, Adelaide, Mar. 2021. [Online]. Available: <https://arena.gov.au/assets/2021/04/escr-sa-battery-energy-storage-final-report.pdf>
6. O. Popov *et al.*, "Risk assessment for the population of Kyiv, Ukraine as a result of atmospheric air pollution", *Journal of Health and Pollution*, vol. 10, no. 25, Mar. 2020, Art. no. 200303, doi: <https://doi.org/10.5696/2156-9614-10.25.200303>
7. A. Iatsyshyn, A. Iatsyshyn, V. Artemchuk, I. Kameneva, V. Kovach, and O. Popov, "Software tools for tasks of sustainable development of environmental problems: Peculiarities of programming and implementation in the specialists' preparation", in *The International Conference on Sustainable Futures: Environmental, Technological, Social and Economic Matters (ICSF 2020)*, Kryvyi Rih, Ukraine, May 20–22, 2020. E3S Web Conferences, 2020, doi: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016601001>
8. P. Lezhniuk, V. Komar, and O. Rubanenko, "Information support for the task of estimation the quality of functioning of the electricity distribution power grids with renewable energy source", in *2020 IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems (ESS)*, Kyiv, Ukraine, May 12–14, 2020. IEEE, 2020, pp. 168–171, doi: <https://doi.org/10.1109/ess50319.2020.9159965>
9. O. Zgurovets and M. Kulyk, "Comparative analysis and recommendations for the use of frequency regulation technologies in integrated power systems with a large share of wind power plants", in *Studies in Systems, Decision and Control*. Cham: Springer Int. Publishing, 2021, pp. 81–99, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-69189-9_5
10. O. V. Kyrylenko, I. V. Blinov, and E. V. Parus, "Evaluation of the operation of power plants in providing ancillary services for primary and secondary frequency regulation in the UES of Ukraine", *Tekhnichna Elektrodynamika*, no. 5, pp. 55–60, 2013. (in Ukrainian)
11. S. Lamichhane, H. Nazaripouya, and S. Mehraeen, "Micro grid stability improvements by employing storage", in *2013 IEEE Green Technologies Conference (GreenTech 2013)*, Denver, CO, USA, Apr. 4–5, 2013. IEEE, 2013, pp. 250–258, doi: <https://doi.org/10.1109/greentech.2013.46>
12. Ukraine, National Commission for State Regulation in the Spheres of Energy and Public Utilities. (2018, Mar. 14). *Resolution of the National Commission for State Regulation in the Spheres of Energy and Public Utilities no. 309, Pro zatverdzhennia Kodeksu systemy peredachi [On approval of the Transmission System Code]*. [Online]. Available: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0309874-18#Text> (in Ukrainian)
13. C. T. M. Clack, Y. Xie, and A. E. MacDonald, "Linear programming techniques for developing an optimal electrical system including high-voltage direct-current transmission and storage", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 68, pp. 103–114, Jun. 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2014.12.049>
14. Q.-C. Zhong and G. Weiss, "Synchronverters: Inverters that mimic synchronous generators", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 4, pp. 1259–1267, Apr. 2011, doi: <https://doi.org/10.1109/tie.2010.2048839>

Надійшло (received) 18.06.2025

UDC 621.311

SKRYPNYK ROSTYSLAV ✉ – Postgraduate Student of the Department of Electric Power Transmission, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-7038-631X>; e-mail: rostyslav.skrypnyk@ieee.khpi.edu.ua.

HRYTSENKO VLADYSLAV – Assistant Lecturer of the Department of Electric Power Stations, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4499-0603>; e-mail: vladyslav.hrytsenko@khpi.edu.ua.

APPLICATION OF CONTROL ALGORITHMS FOR ENERGY STORAGE SYSTEMS INTEGRATED INTO POWER SYSTEMS DOMINATED BY RENEWABLE ENERGY SOURCES

This paper explores the critical issue related to ensuring the reliability and stability of synchronous power system operation under the conditions of a rapid increase in the share of renewable energy generation. In particular, it analyzes how the growing volume of renewable energy sources (RES) leads to a reduction in system inertia, complicating real-time frequency regulation and power balancing. This situation presents new challenges for transmission and distribution system operators, who must adapt traditional grid operation management approaches. The paper examines modern challenges associated with the integration of RES into the power system, particularly solar and wind generation, which are characterized by high variability and low predictability. It highlights the necessity of implementing ancillary services such as frequency regulation, voltage support, and power reserves to maintain stable grid operation amid increasing generation decentralization. Special attention is given to the analysis of inverter control algorithms capable of performing virtual synchronous machine functions, emulating the behavior of conventional synchronous generators. This approach enables the provision of inertial response, frequency oscillation damping, and synchronization with the grid without the use of rotating masses. The article explores the application of energy storage systems as a key element for compensating the intermittency of RES. A generalized approach to modeling and optimizing the use of energy storage in electrical networks is formalized, incorporating calculations based on formulas that consider the characteristics of synchronous generator inertia, regulators, excitation systems, and rotor models. The effectiveness of these models is evaluated for determining optimal operating modes, taking into account load variations, emergency conditions, and generation fluctuations. Finally, the paper discusses the capabilities of specialized software based on the C# (.NET) platform for integration with DlgSILENT PowerFactory to perform static and dynamic stability analyses, as well as modeling of electrical networks with voltage levels ranging from 35 to 750 kV.

Keywords: renewable energy sources; virtual inertia; mathematical modeling; active power balance control system; frequency regulation; inverter; energy storage system.

ЗМІСТ

ДАНИЛЬЧЕНКО Д. О., ГУЙЧУАНЬ ЯН Дослідження системної оптимізації та стратегічного шляху енергетичної безпеки Китаю з точки зору нових досягнень в електротехніці	3
ЗИНОВКІН В. В., ТРЕТЬЯКОВ А. О. Дослідження фазових реактивних опорів трансформаторів спеціального призначення в процесі діагностики системи збудження електромагнітного поля розсіювання	10
ХОМЕНКО І. В., ОРЛОВ В. С., КАРПУШИН М. В., РЯБІНІН С. О. Підвищення точності вимірів електричних величин у мережах Обленерго	18
ШТОМПЕЛЬ О. М. Дослідження квазістаціонарних режимів роботи тягового приводу на основі синхронно-реактивного двигуна з постійними магнітами	23
БРОВКО К. Ю., ВІНОКУРОВА Н. Д., ВЕЛИКОГОРСЬКИЙ О. В. Комп'ютерна симуляція розвитку аварії на Чорнобильській АЕС із застосуванням інтерактивного тренажера-симулятора	31
ДАНИЛЬЧЕНКО Д. О., ЦЮПА В. М. Спосіб реалізації цифровізації релейного захисту та автоматики для електроенергетичних об'єктів розподілення з напругою 6-10 кВ.....	40
ДОРОШЕНКО Д. В. Прогнозування викидів діоксиду вуглецю (CO ₂) з газотурбінних установок за допомогою моделей машинного навчання	47
ДЯЧЕНКО О. В., ГАПОН Д. А., БАЖЕНОВ В. М., РУДЕВІЧ Н. В., ШВЕЦЬ С. В. Дослідження впливу режимів роботи живильної мережі на величину мертвої зони струмової відсічки	53
КОВАЛЬ О. А., КОВАЛЬ В. М., ДЄВОЧКІН В. Ф. Перспективи інвестицій у розвиток відновлювальної енергетики на прикладі Німеччини	60
КОСТЮКОВ І. О., КУЛИК О. С., ЛИТВИНЕНКО С. А., КУБРИК Б. І., ЛАВРІНЕНКО О. В. Експериментальне обґрунтування схеми заміщення трижильного силового кабелю з паперовою імпрегнованою ізоляцією для випадку резистивного заземлення однієї із жил	69
КОСТЮКОВ І. О., ФОЩІЙ М. Д., СИЗОВ Є. В. Способи формування систем рівнянь при визначенні параметрів діелектричної абсорбції ізоляції трижильних силових кабелів із застосуванням сукупних вимірювань	75
НОЗДРЕНКОВ В. С., ДЯГОВЧЕНКО І. М., ПЕТРОВСЬКИЙ М. В. Метод оптимального заряджання електромобілів з урахуванням впливу на розподільчі мережі, трансформатори та якість електроенергії.....	81
НОЗДРЕНКОВ В. С., ПАВЛОВ А. В., ОЛЕКСІЄНКО Г. А., ЖУРАВЛЬОВ О. Ю., КОРЕНЕВ М. І. Адаптивне трьохпозиційне керування вентиляцією в приміщеннях енергетичних підприємств із ризиком накопичення вибухонебезпечних газів	93
ОМЕЛЯНЕНКО Г. В., ЧЕРКАШИНА В. В., МАКАРОВ А. О. Дослідження доцільності застосування накопичувачів електричної енергії в електричних мережах України	101
ПАСТУХОВ М. В., РЯБОВ Є. С. Створення систем електроживлення з використанням детандер-генераторних агрегатів	107
РУДЕВІЧ Н. В., ГАПОН Д. А., ЛАЗАРЄВ М. І., ШВЕЦЬ С. В. Метод навчання експлуатації мікропроцесорних систем релейного захисту та автоматики	112
САВЧЕНКО Н. П., ДОВГАЛЮК О. М., ТРЕТ'ЯК А. В. Автономна Microgrid система для побутових споживачів на базі енергоефективних технологій з відновлюваними джерелами енергії.....	121
СКРИПНИК Р. Я., ГРИЦЕНКО В. В. Дослідження алгоритмів керування сучасних інверторів для систем накопичення з функціями віртуальних синхронних машин	127

CONTENT

DANYLCHENKO D., GUICHUANG YUNG Research on system optimization and strategic path of China's energy security from the perspective of electrical engineering	3
ZINOVKIN V., TRETIKOV A. Study of phase reactances of special-purpose transformers during diagnostics of the excitation system of the electromagnetic scattering field	10
KHOMENKO I., ORLOV V., KARPUSHYN M., RIABININ S. Improving the accuracy of measurement of electrical values in the networks of regional energy companies	18
SHTOMPEL O. Study of quasi-stationary operating modes of a traction drive based on a synchronous-reactive motor with permanent magnets	23
BROVKO K., VYNOKUROVA N., VELYKOHORSKYI O. Computer simulation of the development of the Chernobyl nuclear power plant accident using an interactive simulator	31
DANYLCHENKO D., TSYUPA V. Method of implementing digitisation of relay protection and automation for power distribution facilities with a voltage of 6-10 kV	40
DOROSHENKO D. Prediction of carbon dioxide (CO ₂) emissions from gas turbines using machine learning techniques	47
DIACHENKO O., GAPON D., BAZHENOV V., RUDEVICH N., SHVETS S. Research on the impact of operating modes of the feeding network on the size of the dead zone in current protection	53
KOVAL O., KOVAL V., DEVOCHKIN V. Investment prospects in the development of renewable energy on the example of Germany	60
KOSTIUKOV I., KULYK O., LYTUVYENKO S., KUBRYK B., LAVRINENKO O. Experimental justification of the scheme for replacing a three-core power cable with paper impregnated insulation for the case of resistive grounding of one of the cores	69
KOSTIUKOV I., FOSHCHII M., SYZOV Ye. Methods of formation of system of equations for determination of dielectric absorption parameters of insulation in three-core power cables by applying aggregate measurements	75
NOZDRENKOV V., DIAHOVCHENKO I., PETROVSKYI M. Optimal electric vehicle charging method considering impact on distribution networks, transformer lifespan, and power quality	81
NOZDRENKOV V., PAVLOV A., OLEKSIENKO G., ZHURAVLOV O., KORENEV M. Adaptive three-position control of ventilation in power facility premises with the risk of accumulating explosive gases	93
OMELIANENKO H., CHERKASHYNA V., MAKAROV A. The appropriateness of using electrical energy storage systems to increase the reliability of Ukrainian electrical networks	101
PASTUKHOV M., RIABOV Ye. Creation of power supply systems using expander-generator units	107
RUDEVICH N., GAPON D., LAZARIEV M., SHVETS S. Learning method in the operation of microprocessor systems of relay protection and automation	12
SAVCHENKO N., DOVGLYUK O., TRETIKOV A. Autonomous Microgrid system for domestic consumers based on energy-efficient technologies with renewable energy sources	121
SKRYPNYK R., HRYTSENKO V. Research on control algorithms for modern inverters in energy storage systems with virtual synchronous machine functions	127