

# SMART GRID СИСТЕМИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ

## SMART GRID SYSTEMS AND TECHNOLOGIES

---

UDC 621.314

DOI 10.20535/1813-5420.2.2024.303066

V.P. Nerubatskyi<sup>1</sup>, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, ORCID 0000-0002-4309-601X

D.A. Hordiienko<sup>1</sup>, Ph. D. student ORCID 0000-0002-0347-5656

<sup>1</sup>Ukrainian State University of Railway Transport

### ANALYSIS OF THE SMART GRID CONCEPT IN THE RAILWAY TRACTION POWER SUPPLY SYSTEM

*The Smart Grid network system is a concept of a fully integrated, self-regulating and renewable electric power system, which has a network topology and includes all generating sources, trunk and distribution networks and all types of electric energy consumers, managed by a single network of information and control devices and systems in real time mode. The article proposes the introduction of the Smart Grid concept into the traction power supply system of railways. The functional properties and technical solutions that will allow implementing the principles of Smart Grid intelligent power supply systems are considered. A comparative description of the functional properties of the existing energy system and the energy system based on the Smart Grid concept is presented. Possibilities of introducing Smart Grid into the traction power supply system of direct current due to increasing the carrying capacity of trunk networks, consumption management, location of distributed energy sources in distribution networks and closer to consumers have been determined. The limits of the energy-saving effect from the introduction of the Smart Grid concept into the traction power supply system have been determined.*

**Keywords:** SMART GRID, electric power industry, power supply, energy system, innovative development, network.

#### Introduction

An electricity grid is a collection of multiple grids and power generation companies with multiple operators using different levels of communication and coordination, most of which are manually controlled [1, 2].

The Smart Grid concept is aimed at ensuring the reliability and energy efficiency of power supply, improving the quality of electrical energy, throughput of electrical networks and their control, equalization of variable load graphs, organization of monitoring of parameters and control of the state of the power system, integration of renewable energy sources, reduction of system costs during network reconstruction [3, 4].

Due to the development of the Smart Grid concept, there is a need to introduce intellectual power supply systems on electric mobile composition and traction substations of railway transport. Improving the energy efficiency of traction power supply systems is possible by applying energy-efficient semiconductor converters that will allow to implement the principles of intellectual Smart Grid power supply systems, improve the efficiency of traction power supply systems and electrical thrust and reduce electrical energy.

#### Analysis of Recent Research and Publications

The development of communication systems with the transmission of data over the Internet offers the possibility of much greater monitoring and control throughout the energy system, and therefore more efficient, flexible and cheaper operation. This enables Smart Grid to use new information and communication technologies in the electricity system [5, 6]. However, due to the huge size of the power system and the scale of investments made in it over many years, any significant changes will be expensive and require careful justification.

The implementation of the basic requirements of the Smart Grid concept can be ensured by developing traditional and creating new functional properties of the power system and its elements. Within the framework of the Smart Grid concept to achieve the basic requirements, the development of certain functional properties should be envisaged [7, 8]. Improving the efficiency and reliability of smart grids is expected to save consumers money and help reduce CO<sub>2</sub> emissions.

In paper [9] it is stipulated that the Smart Grid energy system must simplify the relationship of distributed generation and electricity storage systems by creating a standardized relationship "Network – Generation", close concept of Plug and Play, which is used in modern computer systems.

Thus, in order to implement Smart Grid, it is necessary to optimize the solution of many aspects of technical, regulatory, environmental and cultural issues.

#### Purpose and Objectives of the Study

The purpose of the study is to analyze the energy efficiency of the traction power supply system with the integrated Smart Grid concept. To achieve this purpose, the following tasks are set:

- consider the functional properties and technical solutions that will allow implementing the principles of Smart Grid intelligent power supply systems;
- to present a comparative description of the functional properties of the existing energy system and the energy system based on the Smart Grid concept;
- determine the energy-saving effect of the implementation of the Smart Grid concept.

**Main Material of the Study**

At the current stage of energy development, technical means of intelligent systems, as well as advanced technical solutions of semiconductor power converters, play a decisive role in implementing the provisions of the Smart Grid concept [10, 11]. Prospective technical means can be divided into the following main groups:

- intelligent information sensors, control and measuring devices, accounting and control devices;
- data collection and transmission systems containing distributed intelligent devices and analytical tools to support communications at the level of power system objects;
- intelligent forecasting, support and decision-making systems (in particular, intelligent adaptive protection and automation systems with the function of automatic power restoration);
- improved topologies of semiconductor converters and implementation of active power components of the electrical network;
- integrated information exchange systems.

The transition from a conventional energy system to a Smart Grid system that meets the requirements of Industry 4.0 includes 6 stages [12].

1. Computerization. Computerization refers to the provision of means for digital control of all the main components of the system.

2. Network interaction (connectivity). At this stage, isolated technologies are combined into a common network that meets the requirements of the energy system. Usually, Internet Protocol (IP) connections are used for this purpose, thus forming the Internet of Things. Network interaction allows to combine CAD/CAM automatic design and production procedures with Manufacturing Execution System (MES) technological process management tools, organize remote service, etc.

3. Availability for review (visibility). Visibility refers to the creation of a digital reflection or virtual double of the system. Falling prices for sensors and other digital equipment make this possible. The more sensors, the more accurate the display. The presence of a display related to PLM, ERP and MES systems allows operators to see the status of the system in real time and make the necessary decisions.

4. Transparency. Transparency in this context means the connection of digital display with analytical systems, more widely known as big data systems. At this stage, the following tasks are solved:

- transformation of the original "raw" data into a form suitable for analysis;
- actual data analysis;
- data interpretation;
- application of the obtained results in practice.

5. Prediction (predictive capacity). Transition to real-time planning tasks based on reliable information about the state of the energy system.

6. Adaptability. Ensuring automatic response of the control system to most production situations. That is, it is a solution that is created individually for specific equipment and is individually configured, thanks to which the system will be able to trigger automatic reactions to production events from production.

If the first two stages assigned to the Digitalization group, that is, the development of digital approaches, are purely technological, then the other stages, according to Industry 4.0, are to a greater extent cybernetic, as they embody system principles.

The scheme of the existing energy system of traction power supply, which does not meet the requirements of Industry 4.0, is shown in Fig. 1.

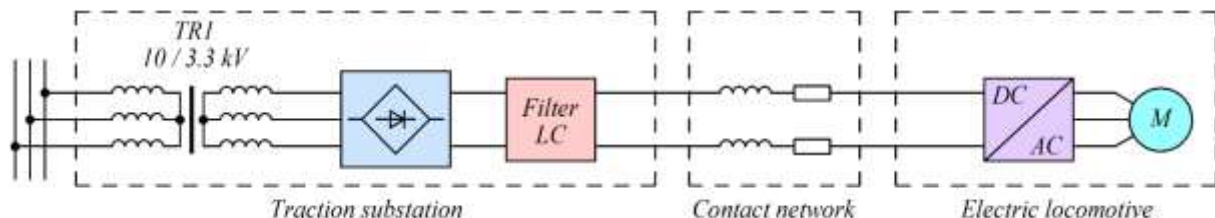


Figure 1 – Scheme of the existing energy system of traction power supply

The existing energy system has a number of disadvantages, including:

- low efficiency due to the presence of significant active resistance in the contact network and the presence of a passive voltage rectifier, which has high static energy losses on the diodes;

- significant emission of higher harmonic current components into the alternating current power supply network and higher voltage harmonics into the direct current network;
- lack of possibility of energy recovery to the contact network;
- low power factor;
- high mass and size indicators.

When applying the Smart Grid concept, it is important to determine the technical parameters and characteristics of the traction power supply system.

Computerization must be carried out both on the side of the system performing data collection and analysis (operator) and on the side of the energy system installed directly on the rolling stock.

The information collection and processing system (operator) includes:

- a personal computer;
- GSM module connected to a computer;
- database.

A personal computer (PC) connects to the GSM module. With the help of the GSM module, the PC receives information from the systems installed on the rolling stock.

If the appropriate software (software) is available, the PC operator can conduct current analysis of the received data.

Analysis results can be saved to the database.

The GSM module must have a communication interface (USB, Ethernet or RS-232) to connect to a PC.

Basic requirements for GSM modules:

- receiving and sending SMS;
- reception and transmission using GPRS;
- work with RS-232 or RS-485 serial interfaces;
- allows to control the reception and transmission of data on serial RS-232 or RS-485 interfaces using AT commands in accordance with GSM 07.05 and GSM 07.07 standards.

Modern industry provides a wide selection of such modules:

- Siemens MC35i Terminal (GSM900/1800+GPRS standard);
- 3G UMTS/HSPA + Wi-Fi router UR5i v2 Libratum;
- GSM/GPRS modem OVEN PM01;
- GSM modem iRZ MC52iT;
- SQUID-1H and SQUID-2H.

Special attention should be paid to GSM routers SQUID-1H and SQUID-2H, which provide constant on-line communication between remote objects and the control center, and allow not only to receive information from objects, but also to manage them [13, 14]. The main characteristics of SQUID GSM routers:

- reception and transmission of data using GPRS;
- receiving and sending SMS;
- data archiving on an SD card;
- sending archival data to e-mail;
- presence of built-in analog and discrete inputs/outputs.

A computer is used as a server at the control room. Information exchange between GSM routers and a computer takes place via the Internet. GSM routers form a "transparent" GSM channel, and are actually "remote" serial COM ports. This allows to connect a large number of routers to computer. At the same time, data is transferred simultaneously, without a noticeable loss of exchange speed. The delay of updating data from 125 objects is 2...3 s, respectively from 250 objects – 4...6 s.

If there is no possibility to connect to the Internet in the control room, then SQUID-1H-server is used as a server or a standard 3G modem from any mobile operator. SQUID GSM routers use GPRS packet data transmission, which is the cheapest method of data transmission. The amount of data transmitted to the central dispatch center around the clock is included in any selected tariff plan without additional charges.

Any SCADA system that supports the Modbus protocol can be installed on the control room computer. The software "SQUID-configurator" and "SquidService" for working with SQUID-1H and SQUID-2H GSM routers is free and available for download on the company's website.

According to industry standards, the selected database must be a real-time database, meaning it must provide real-time data synchronization, replication, and backup [15, 16]. Databases must provide real-time data storage, processing and output. A real-time system is a hardware and software complex that reacts at set times to an unpredictable flow of external events. This means that:

- the system must have time to react to the event that occurred at the facility within the time critical for this event. The value of the critical time for each event is determined by the object and between the events, and naturally can be different, but the reaction time of the system must be predicted (calculated) when creating the system. Failure to respond within set hours is considered an error for real-time systems;

– the system must have time to react to events occurring simultaneously. Even if two or more external events occur simultaneously, the system must have time to react to each of them within the time intervals critical for these events.

There are two types of real-time systems: hard real-time systems and soft real-time systems. Hard real-time systems do not allow any system response delays under any circumstances in the following cases:

- the results may turn out to be irrelevant in case of delay;
- an accident may occur if the reaction is delayed.

Examples of hard real-time systems: on-board control systems, emergency protection systems, emergency event recorders. Soft real-time systems are characterized by the fact that the reaction delay is not critical, although it can lead to an increase in the cost of the results and a decrease in the performance of the system as a whole.

Real-time databases are ordinary databases with additional capabilities that can provide reliable performance. Time constants are used, which make up a certain range of time values for which the data is still relevant. This range can be called the time of relevance. A standard database cannot work in such conditions, as the mismatch between real-world objects and the data that represents them is too severe. An efficient system must handle urgent requests, return only time-reliable data, and maintain priority queues. To enter data into a record, often a sensor or input device monitors the state of the physical system and updates the database with new information that more accurately represents the physical system. When designing a real-time database system, consider how the facts will be related to the real-time system. Need to think about how to represent the values in the database so that the transaction processing takes place correctly and the consistency of the data does not have any violations.

The information collection and processing system includes:

- software logic controller;
- a system of sensors and alarms;
- GSM module;
- personal computer (PC).

According to parameters, programming tools, features of combining modules and appearance, controllers for automation systems can be divided into the following groups:

- programmable relays;
- modular programmable logic controllers (PLC);
- human-machine interface + programmable logic controller (HMI + PLC).

Programmable relays are the simplest and cheapest programmable devices that were created to automate simple systems that do not require a large number of inputs/outputs. They possess the full range of technical resources required for use in industrial automation, mechanical engineering or manufacturing at the lower level of automation [17, 18]. Programmable relays of the following manufacturers are represented in Ukraine:

- Siemens – Logo series;
- Eaton (Moeller) – Easy series;
- ABB – CL series;
- Mitsubishi – Alpha;
- Schneider Electric – Zelio Logic;
- OVEN PR100 and OVEN PR200.

Modular PLCs are characterized by an extended structure. The basic device can function individually and usually contains a minimum of 8 inputs/outputs, and if necessary, their number can be expanded with additional modules up to 65536 discrete / 4096 analog channels. This gives great flexibility when creating automation systems of technological processes based on modular PLCs.

The following modular PLCs are presented on the Ukrainian market:

- Siemens – SIMATIC-S7 series;
- Eaton (Moeller) – XC100, XC200 series;
- ABB – AC500 series;
- Mitsubishi – System Q series;
- Schneider Electric – Modicon series.

Modular PLCs support the functions of programmable relays, but additionally have built-in network interfaces and the ability to expand internal memory and input/output modules within wide limits [19, 20]. HMI + PLC systems are used to visualize the technological process and create simple SCADA systems. Depending on the model of the device, the HMI may not support PLC functions, but it must have a graphic display to display the technological process and an advanced input device that the operator uses to influence the technological process.

To communicate with other elements of the automation system, such devices use network protocols CANopen, Profibus-DP, etc. HMI + PLC systems have the following functionality:

- visualization of technological process parameters in text or graphic modes;
- construction of diagrams and graphs, output of the report;

– management and processing of emergency messages, registration of time and date of occurrence of emergency messages;

- manual control using functional buttons or touch screen;
- the possibility of free programming of graphs and setting of function keys.

Display of information about the technological process is carried out using a symbolic or graphic screen, the size of which depends on the requirements of the technological process, and button or touch controls are used to enter information. HMI + PLC devices of the following main manufacturers are represented on the market of Ukraine:

- Siemens – SIMATIC HMI IPC series;
- Eaton (Moeller) – series XV1, XV2, XV3, XV4, MI4, MFD4;
- ABB – series CP400, CP400;
- Mitsubishi – Vision 1000, E1000, IPC1000, GOT1000 series;
- Schneider Electric – Magelis series STO, STU, XBT GT, XBT GTW, XBT N, Compact iPC, Panel PC.

The system of sensors and meters includes:

- sensors of electrical network parameters: currents, voltages, active and reactive power;
- temperature sensors;
- humidity sensors;
- pressure sensors.

The system includes a computer that connects to the system using a GSM wireless channel. This makes it possible to connect several energy systems into a single network with minimal communication costs.

Network interaction of intelligent sensors is implemented using GSM modules, which are connected to PLC modules using the RS-485 interface. GSM modules work at frequencies of the decimeter range (about 2 GHz), the data transfer speed is more than 2 Mbit/s (3G standard). This makes it possible to organize communication between energy systems and the operator.

Availability for review is organized by installing appropriate software on the operator's computer. The software builds a model, which is a complete copy of the energy system, based on the data obtained from real energy systems. The operator has the opportunity to flexibly analyze the system's operating modes.

The scheme of the proposed energy system of traction power supply when applying the Smart Grid concept is shown in Fig. 2.

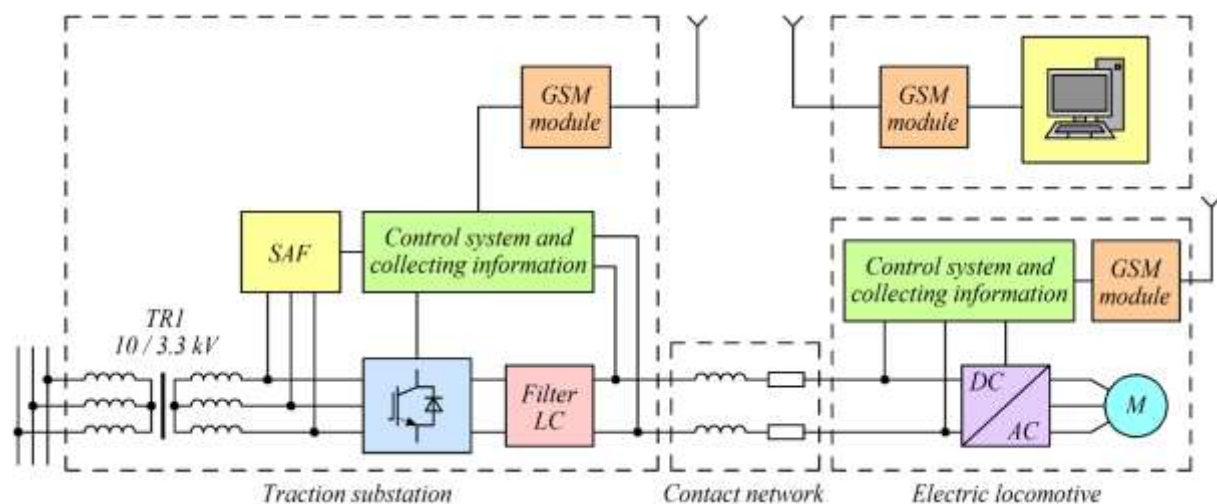


Figure 2 – Scheme of the proposed energy system with the Smart Grid concept

The comparative characteristics of the functional properties of the existing energy system and the energy system based on the Smart Grid concept are given in the Table 1.

An energy system built in accordance with the Smart Grid concept has the following advantages:

- the power factor is close to unity;
- the possibility of energy recovery from the contact network to the general industrial network;
- higher efficiency (a possible increase of 5...8 %);
- smaller coefficient of harmonic distortions;
- the possibility of monitoring the state of the energy system online;
- the ability to adjust and stabilize the voltage in the contact network of the system online;
- the possibility of connecting alternative power sources to the contact railway catenary network.

The energy system based on the Smart Grid concept should simplify the relationship between distributed generation and electricity storage systems. The spread of distributed generation will create new opportunities for the grid due to its more mobile nature and more stable characteristics, which are able to eliminate outages and dramatic voltage dips in the grid.

Smart Grid will reduce system losses, minimize reserve capacity, reduce capital and maintenance costs by optimizing the use of generating resources and adjusting the grid load schedule. Information about the state of the network will prevent most accidents and make repairs much faster when an accident does occur.

Table 1 – Comparative characteristics of functional properties of energy systems

Existing energy system	Energy system based on the Smart Grid concept
One-way communication between elements or its absence	Two-way communication
Centralized generation is a complex integrated distributed generation	Distributed generation
Reaction to the consequences of the accident	Response to accident prevention
Equipment operation until failure	Monitoring and self-diagnostics, which extend the "life" of the equipment
Manual recovery	Automatic recovery
Susceptibility to system crashes	Prevention of the development of system accidents
Inspection of equipment on site	Remote equipment monitoring
Limited power flow control	Power flow control
Unavailable or outdated information about the price for the consumer	Price in real time

### Conclusions

On the basis of the conducted research, the following conclusions can be drawn:

- implementation of the main requirements of the Smart Grid concept can be ensured by developing traditional and creating new functional properties of the power system and its elements;
- in the energy system based on the Smart Grid concept, dynamic data obtained from equipment and sensors are used, due to which the bandwidth of networks is optimized and the probability of accidents is reduced;
- the proposed concept of Smart Grid allows to improve the coefficients of the efficiency of traction power supply and electric traction systems, as well as to reduce the consumption of electrical energy.

### Acknowledgement

The article was prepared as part of the support of the grant of young scientists of Ukraine "Development of scientific bases for improving energy efficiency and improving the quality of electricity in electricity networks" (State Registration Number 0121U109440).

### References

1. Kpoze A., Degila J., Soude H., Wamba S. Smart Grid Architecture: A Bibliometric Analysis and Future Research Directions. *2022 2nd International Conference on Innovative Practices in Technology and Management (ICIPTM)*. 2022. P. 441–448. DOI: 10.1109/ICIPTM54933.2022.9754210.
2. Nerubatskyi V., Plakhtii O., Hordiienko D. Control and accounting of parameters of electricity consumption in distribution networks. *2021 XXXI International Scientific Symposium Metrology and Metrology Assurance (MMA)*. 2021. P. 114–117. DOI: 10.1109/MMA52675.2021.9610907.
3. Mustafin T., Kuprianova L., Ladogina A., Pyatkova O. Smart Grid: Leading International Experience of Marketing and its Contribution to Sustainable and Environmental Development of Energy Economy. *Frontiers in Energy Research*. 2022. Vol 10. P. 1–5. DOI: 10.3389/fenrg.2022.944798.
4. Nerubatskyi V. P., Plakhtii O. A., Hordiienko D. A., Syniavskiy A. V., Philipjeva M. V. Use of modern technologies in the problems of automation of data collection in intellectual power supply systems. *Modern engineering and innovative technologies*. 2022. Issue 19, Part 1. P. 38–51. DOI: 10.30890/2567-5273.2022-19-01-058.
5. Ahmed S., Gondal T. M., Adil M., Malik S. A., Qureshi R. A Survey on Communication Technologies in Smart Grid. *2019 IEEE PES GTD Grand International Conference and Exposition Asia (GTD Asia)*. 2019. P. 7–12. DOI: 10.1109/GTDAsia.2019.8715993.
6. Abrahamsen. F., Ai Y., Cheffena M. Communication Technologies for Smart Grid: A Comprehensive Survey. *Sensors*. 2021. Vol. 21 (23): 8087. DOI: 10.3390/s21238087.
7. Smirnov V., Danilochkina N., Shangaraev R., Delyatitskaya A. Smart grid and ripple control technologies in energy and road construction. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 918 (012061). P. 1–7. DOI: 10.1088/1757-899X/918/1/012061.

8. Li D., Sun H., Chiu W.-Y. Achieving Low Carbon Emission Using Smart Grid Technologies. *2017 IEEE 85th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*. 2017. P. 1–5. DOI: 10.1109/VTCSpring.2017.8108624.
9. Le Floch C., Bansal S., Tomlin C. J., Moura S. J., Zeilinger M. N. Plug-and-Play Model Predictive Control for Load Shaping and Voltage Control in Smart Grids. *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2019. Vol. 10, No. 3. P.2334–2344. DOI: 10.1109/TSG.2017.2655461.
10. Kuzlu M., Pipattanasompom M., Rahman S. A comprehensive review of smart grid related standards and protocols. *2017 5th International Istanbul Smart Grid and Cities Congress and Fair (ICSG)*. 2017. P. 12–16. DOI: 10.1109/SGCF.2017.7947600.
11. Nerubatskyi V., Plakhtii O., Hordiienko D., Khoruzhevskiy H. Study of energy parameters in alternative power source microgrid systems with multilevel inverters. *International scientific journal «Industry 4.0»*. 2020. Vol. 5, Issue 3. P. 118–121.
12. Noor Q., Sana S., Haneen Q. Smart grid in the context of industry 4.0: an overview of communications technologies and challenges. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*. 2020. Vol. 18. P. 656–665. DOI: 10.11591/ijeecs.v18.i2.pp656-665.
13. Santhosh C., Kumer A., Krishna C., Vaishnavi M., Sairam P., Kasulu P. IoT based smart energy meter using GSM. *Materials Today: Proceedings*. 2021. Vol. 46 (9). P. 4122–4124. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.02.641.
14. Emalu M., Ibrahim A., Kalulu M., Mufana W., Ginabel O., Yusuf O. Electrical Smart Grid Resilience Based on GSM Technology. 2020. Vol. 4, Issue 4. P. 36–49.
15. Yilmaz E., Polat H., Oyucu S., Aksoz A., Saygin A. Data storage in smart grid systems. *2018 6th International Istanbul Smart Grids and Cities Congress and Fair (ICSG)*. 2018. P. 110–113. DOI: 10.1109/SGCF.2018.8408953.
16. Su Y., Yang Z., Guo N., Yang H. Improving Quality of Smart Grid Data by Functional Data Analysis. *2021 2nd International Symposium on Computer Engineering and Intelligent Communications (ISCEIC)*. 2021. P. 12–17. DOI: 10.1109/ISCEIC53685.2021.00010.
17. Huang S. Research on Relay Protection Technology Based on Smart Grid. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021. Vol. 714 (042084). P. 1–7. DOI: 10.1088/1755-1315/714/4/042084.
18. Celeita D., Hernandez M., Ramos G., Penafiel N., Rangel M., Bernal J. Implementation of an educational real-time platform for relaying automation on smart grids. *Electric Power Systems Research*. 2016. Vol. 130. P. 156–166. DOI: 10.1016/j.epsr.2015.09.003.
19. Jedrychowski R. The use of PLC controllers to simulate data exchange processes in Smart Grid. *2019 Progress in Applied Electrical Engineering (PAEE)*. 2019. P. 1–6. DOI: 10.1109/PAEE.2019.8788982.
20. Poluektov A., Pinomaa A., Kosonen A., Romanenko A., Ahola J. PLC for monitoring and control of distributed generators in smart grids. *Power Line Communication Systems for Smart Grids*. 2018. DOI: 10.1049/PBPO132E\_ch12.

**В. П. Нерубацький<sup>1</sup>**, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0002-4309-601X

**Д. А. Гордієнко<sup>1</sup>**, аспірант, ORCID 0000-0002-0347-5656

<sup>1</sup>Український державний університет залізничного транспорту

## **АНАЛІЗ КОНЦЕПЦІЇ SMART GRID В СИСТЕМІ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЗАЛІЗНИЦЬ**

*Система мережі Smart Grid – це концепція повністю інтегрованої, саморегульованої та відновлюваної електроенергетичної системи, що має мережеву топологію і включає в себе всі генеруючі джерела, магістральні та розподільні мережі та всі типи споживачів електричної енергії, що керуються єдиною мережею інформаційно-керуючих пристроїв і систем в режимі реального часу. У роботі запропоновано впровадження концепції Smart Grid в систему тягового електропостачання залізниць. Розглянуто функціональні властивості та технічні рішення, що дозволять реалізувати принципи інтелектуальних систем електропостачання Smart Grid. Представлено порівняльну характеристику функціональних властивостей існуючої енергетичної системи та енергетичної системи на базі концепції Smart Grid. Визначено можливості впровадження Smart Grid в систему тягового електропостачання постійного струму за рахунок збільшення пропускної спроможності магістральних мереж, керування споживанням, розташування розподілених джерел енергії в розподільних мережах та ближче до споживачів. Визначено межі енергозберігаючого ефекту від впровадження концепції Smart Grid в систему тягового електропостачання.*

**Ключові слова:** SMART GRID, електроенергетика, електропостачання, енергетична система, інноваційний розвиток, мережа.

Надійшла: 18.01.2024

Received: 18.01.2024

# ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

## ENERGY SYSTEMS AND COMPLEXES

УДК 621.314

DOI 10.20535/1813-5420.2.2024.303068

К.М. Гілевич<sup>1</sup>, аспірантка, ORCID 0000-0001-9074-0683

<sup>1</sup>Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

### АНАЛІЗ РІВНІВ НЕОПТИМАЛЬНОСТІ РЕЖИМІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ НИЗЬКОЇ НАПРУГИ ПРИ НЕРІВНОМІРНОСТІ ГЕНЕРАЦІЇ ТА СПОЖИВАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

Здійснено аналіз рівнів неоптимальності процесів генерації та споживання електроенергії в електричних мережах низької напруги при нерівномірності генерації та споживання електроенергії. Систематизовано заходи щодо зниження втрат електроенергії в таких мережах. Наведено оцінку впливу нерівномірності генерації та споживання електроенергії на рівні втрат у електричній мережі. З метою зменшення втрат електроенергії шляхом аналізу потенціалу керування режимами електропостачання запропоновано використати метод оцінки неоптимальних рівнів генерації та споживання електроенергії електроенергетичної системи за допомогою реактивної потужності Фризе  $Q_f$ .

Неоптимальність відбору від генератора та споживання навантаженнями електроенергії оцінено з точки зору роботи електроенергетичної системи в цілому. Як критерій оцінки вибрано ступінь відхилення від рівномірного енергоспоживання по відношенню до середнього рівня передачі активної потужності за заданий інтервал часу. Потужність Фризе  $Q_f$  використовується для порівняння реального режиму роботи електроенергетичної системи з оптимальним режимом. Цей розрахунок може охоплювати будь-який період часу. Використання  $Q_f$  дозволило уніфікувати аналіз процесів енергозабезпечення навантажень електроенергетичної системи, забезпечує можливість ретроспективного, поточного і перспективного аналізу. Застосування потужності Фризе  $Q_f$  надає можливість оцінити техніко-економічні і технологічні фактори, такі як вплив різних факторів появи додаткових втрат електроенергії, стійкість і стабільність роботи системи при зміні режимів роботи генераторів та навантажень.

Проведений аналіз дозволив запропонувати алгоритм оцінки рівня оптимальності ведення режимів в електричних мережах, який може бути реалізованим як із залученням диспетчера, так і в автоматичному режимі. Особливої актуальності набуває оцінка адресного впливу на основі потужності Фризе для локальних електроенергетичних систем, де широко застосовуються різні типи генераторів обмеженої потужності на основі відновлюваної енергії та різноманітні типи технологій енергоспоживання.

**Ключові слова:** електромережі, режими роботи генераторів та навантажень, оцінка рівня оптимальності процесів, втрати електроенергії, потужність Фризе, адресний вплив.

#### Вступ

З огляду на різноманіття сучасних режимів роботи електромереж стає очевидною необхідність нових підходів до оцінки в них енергетичних процесів та втрат електроенергії [1–4]. Оптимізація втрат електроенергії та їх оцінка сприяє економнішому функціонуванню енергомережі. Знаючи місця втрат електроенергії, можна вжити заходи для їх обмеження та зменшення, що призведе до підвищення ефективності роботи системи. Переважно, втрати в електроенергетичній системі можна розділити на технічні втрати, спричинені внутрішніми факторами, та нетехнічні втрати, викликані зовнішніми чинниками. Загалом втрати потужності в електроенергетичній системі призводять до зростання операційних витрат на обладнання і, відповідно, впливають на вартість електричної енергії [2]. Збільшений рівень втрат електроенергії під час її транспортування та розподілу зумовлений низкою факторів. В електричних мережах нашої країни проявляються такі характеристики, як велика проектна щільність струму, що складає приблизно 1 А/мм<sup>2</sup>, порівняно з 0,4–0,6 А/мм<sup>2</sup> в країнах з розвинутим сучасним енергетичним комплексом. Також високий рівень неоднорідності, оскільки цей параметр практично не враховувався в нормативах проектування. Зважаючи на гострий дефіцит енергоносіїв під час війни в Україні контроль рівню споживання та методи ефективного використання електроенергії є важливими економічними аспектами.



Проблема зменшення втрат електроенергії є важливою частиною більш загальної проблеми зменшення енергоспоживання та ефективного використання енергоресурсів. Оптимізація балансу між споживанням і виробництвом електроенергії є важливою частиною більш загальної проблеми зниження енергоспоживання та ефективного використання енергоресурсів.

Електричні мережі великою мірою піддається втратам при передачі та розподілі – майже 40%, включаючи як технічні, так і нетехнічні [1–4]. Зазвичай, втрати потужності в енергетичній системі призводять до зростання експлуатаційних витрат електроустановок і, відповідно, сприяють високій вартості електричної енергії. Отже, зменшення втрат потужності в електроенергетичній системі є критично важливим не лише з фінансової та економічної перспективи, але й в контексті соціально-економічних вигод для комунальної компанії, споживачів і країни в цілому.

Основні джерела технологічних втрат електроенергії в електричних мережах: втрати, пов'язані з переносом навантаження через провідники ліній електропередачі (ЛЕП) та обмотки силових трансформаторів підстанцій; енергетичні втрати у залізі осердь трансформаторів у режимі холостого ходу; втрати, що виникають через випромінювання корони провідників ЛЕП; втрати енергії в компенсаційних пристроях (компенсатори на основі конденсаторних батарей, синхронні компенсатори, статичні тиристорні компенсатори тощо) [2, 3, 4–6].

Ефективний спосіб досягнення низьких втрат при передачі у системі може включати в себе розміщення генеруючих потужностей поблизу центрів навантаження [1 – 3]. При цьому зазначимо, що у сьогоднішніх реаліях в Україні набуває розвитку зміна концепції оцінки електроенергії: перехід від опису в двомірній системі (кількість  $\times$  вартість) до опису в тримірній системі (кількість  $\times$  вартість  $\times$  якість).

### 1. Аналіз складових втрат електроенергії

Для вирішення проблеми зниження втрат електроенергії необхідно провести ретельний аналіз та структурування, спрямовані на визначення причин та створення ефективних стратегій запобігання втрат [1, 2, 7]. Оскільки сутність комерційних втрат ускладнено їх прямим визначенням та вимагає значних витрат капіталу, то з іншого боку, технологічні втрати, за наявності відповідної інформаційної бази, можуть бути точно визначені [5, 7]. Це відкриває можливість опосередкованого аналізу, який охоплює і комерційний аспект. Вартість стандартизованих технічних втрат зазвичай включається в тарифи на передачу і є збитком для енергопостачальної компанії. Обсяг технічних втрат розраховується за допомогою математичних методів відповідно до законів електротехніки.

Комерційні втрати електроенергії виникають під час передачі електроенергії від виробника до споживача. Ці втрати є основними втратами електропередавальної компанії і включаються до тарифу. Вони розраховуються як різниця між фактичними втратами та технічними втратами. Комерційні втрати в основному спричинені нестабільним споживанням електроенергії з різних причин і не покладаються на споживачів. Згідно з чинним законодавством, оплата фактичних комерційних втрат є обов'язком мережевої організації, відповідальної за ці втрати. Для того, щоб визначити комерційні втрати електроенергії якомога точніше, важливим є точне вимірювання та правильний розрахунок електроенергії [7–9].

Структуру методів визначення технологічних втрат електроенергії в електромережах 0,38 кВ поділено на кілька етапів [1, 10, 11]:

- якісні характеристики схем електромереж: огляд якісних параметрів схем електромереж; визначення характеру та величини електроспоживання;
- пасивні елементи та їх характеристики: аналіз кількісних характеристик параметрів пасивних елементів; отримання повної інформації про поопорні схеми електромереж;
- електроспоживання та контрольні заходи: періодичні контрольні заходи для уточнення характеру та обсягу електроспоживання; постійне уточнення інформації про поопорні схеми електромереж;
- визначення технологічних втрат електроенергії в електромережах 0,38 кВ: визначення еквівалентного опору електромереж 0,38 кВ за наявною інформацією; визначення втрат електроенергії методом еквівалентного опору; визначення еквівалентного опору електромереж 0,38 кВ за результатами поелементного розрахунку втрат електроенергії за звітний період; визначення втрат електроенергії методом еквівалентного опору;
- формування пофазної розрахункової схеми електромереж 0,38 кВ: визначення середніх навантажень споживачів за період розрахунку; визначення втрат електроенергії методом поелементних розрахунків.

Втрати в електромережах 0,38 кВ запропоновано, наприклад, розраховувати за формулою [1]:

$$\Delta W_{0,38} = 3I_{\Gamma}^2 R_{ек} k_{\phi}^2 T; \quad (1)$$

де  $I_{\Gamma}$  – середній струм головної ділянки ЕМ;  $R_{ек}$  – еквівалентний опір розподільної мережі 0,38 кВ;  $k_{\phi}$  – коефіцієнт форми графіка еквівалентного струмового навантаження ЕМ 0,38 кВ;  $T$  – тривалість звітного періоду.

Еквівалентний опір визначається на основі попередньо зібраної інформації [1]:

$$R_{ек} = \frac{\Delta W'_{0,38}}{3I_T^2 k_\phi^2 T'}; \quad (2)$$

де  $\Delta W'_{0,38} = W'_{п.м.} - W'_{в.м.}$  – втрати електроенергії за період  $T'$ , який передує звітному періоду;  $W'_{п.м.}$  – електроенергія, яка поступила в мережу за період  $T'$ ;  $W'_{в.м.}$  – електроенергія, яка відпущена споживачам і значення якої визначається фактором розрахунків споживачів за електроенергію.

В роботі [6] представлено метод оцінки втрат електроенергії у мережах напругою 0,38 кВ, використовуючи загальну довжину ліній. Згідно з цим підходом, еквівалентний опір лінії без розгалужень розраховується таким чином:

$$R_{ек} = r_0 L k_L; \quad (3)$$

де  $r_0$  – питомий опір проводу, Ом/км;  $L$  – довжина лінії, км;  $k_L$  – коефіцієнт, який враховує тип навантаження ( $k_L = 1$ , якщо навантаження сконцентроване в кінці лінії;  $k_L = 0,37$ , якщо навантаження розподілене вздовж лінії).

Метод визначення еквівалентного опору  $R_{ек}$  базується на певних припущеннях. Однак загальна структура, наведена вище, дає досить точні результати, якщо припустити, що споживання електроенергії оплачується стабільно, вимоги до експлуатації лінії електропередачі виконуються, навантаження рівномірно розподіляється на кожну фазу, а інші фактори задовольняються. За цих умов для розрахунку поточних втрат можна використовувати еквівалентні опори, розраховані за попередні звітні періоди. Тому цей метод визначення технологічних втрат слід оцінювати з урахуванням цих обмежень [1, 10].

Для адекватної оцінки втрат електроенергії в мережах важливе значення має використання сучасних систем обліку [12–14].

На початку 80-х років ХХ ст. у світі з'явилися лічильники електроенергії змінного струму, що складаються з електронних компонентів. Оскільки цей тип лічильника електроенергії не має компонентів, що обертаються, стандарт ІЕС визначає його як статичний (електронний) лічильник електроенергії, щоб відрізнити його від індуктивного лічильника електроенергії. У електронному лічильнику енергії вимірювання електричної енергії повністю виконується електронними схемами та електронними модулями, а результати розрахунків і параметри вимірювань контролюються програмним забезпеченням, яке демонструє велику гнучкість.

Електронний лічильник енергії може вимірювати активну енергію, реактивну енергію та повну енергію одночасно одним приладом обліку [13, 14]. Крім того, він може легко реалізувати функції максимального попиту, передоплати, мультитарифності і зв'язку. Ці характеристики електронних лічильників енергії сприяли розвитку технології автоматичного зчитування лічильників. Тому з'явилися Smart лічильники енергії як один із основних компонентів передової системи вимірювання Smart Grid. Цей лічильник відповідає за збір, вимірювання, передачу та обробку даних про електроенергію, а також підтримує інтелектуальну мережу для управління енергетичним навантаженням, вимірювання розподіленої енергії, функціонування та планування електромережі, транзакцій на ринку електроенергії та електроенергії. моніторинг якості тощо. Smart лічильники енергії має широкі можливості збору даних, включаючи напругу, струм, активну потужність, реактивну потужність і потужність спотворення; підтримує передплачене та дистанційне керування; підтримує двосторонній зв'язок, надаючи шлюз даних для майбутніх мереж домашньої автоматизації.

Порівняно з традиційними електронними лічильниками енергії, Smart лічильники енергії мають такі функції на додаток до основних функцій вимірювання [14]:

- широкий спектр функцій вимірювання струму, напруги та інших електричних параметрів для задоволення потреб моніторингу роботи в різних середовищах на місці;
- вимірювання попиту, часу використання та сегментованого вимірювання, щоб задовольнити потреби впровадження цін на електроенергію за часом використання та ступінчастих цін на електроенергію;
- двостороннього вимірювання енергії та підтримка доступу до розподілених споживачів енергії;
- апаратного годинника, зберігання та заморожування узгоджених пілотних даних, записи про відключення електроенергії та інші записи про події, записи про навантаження, показання лічильника про відключення електроенергії, тривога про події та інші функції для задоволення відключень та врегулювання відключень електроенергії, виявлення помилок вимірювання та вирішення спорів;
- онлайн-моніторингу, діагностики, сигналізації та інтелектуальної обробки ненормального енергоспоживання для задоволення потреб обробки несправностей та онлайн-моніторингу вимірювальних приладів;
- віддаленого або локального контролю витрат і задоволення потреби контролю заборгованості, запобігання крадіжці електроенергії та керування навантаженням за допомогою заходів автентифікації інформаційної безпеки;

Завдяки різноманітним комунікаційним інтерфейсам він може реалізувати такі функції обміну даними, як збір інформації про споживання електроенергії, дистанційне налаштування параметрів, контроль навантаження та звітування про події. Smart лічильники можуть вести облік витрат електричної енергії залежно від часу доби (так звані, дво- або тризонні лічильники), вимірювати параметри мережі, захищати споживачів електричного струму від критичних коливань напруги. За допомогою телекомунікаційних мереж їх можна об'єднувати в єдину мережу, щоб обмінюватися інформацією зі Smart Grid, повідомляти про аварійні ситуації або в автоматичному режимі передавати дані про витрату електроенергії.

## **2. Заходи по зниженню втрат електроенергії**

Однією з основних характеристик електричної системи є підтримання постійного балансу між активною та реактивною енергією і потужністю. Транспортування електроенергії завжди пов'язане з втратами самої енергії через її передачу по лініях електропередачі та трансформацією. Для зменшення цих втрат під час технічних процесів застосовуються різні заходи, які зокрема, можна розділити на дві основні групи залежно від періоду впровадження: заходи з управління розвитком мережі та заходи з керування режимом роботи мережі [4, 8–11]. Заходи щодо зниження втрат електроенергії можна поділити на дві стратегії, які включають комплекс заходів для оптимізації роботи електричних мереж – це керування мережами та керування споживачами.

Керування мережами можна умовно поділити на заходи, які спрямовані на керування розвитком мереж та керування режимами роботи мереж [4]. Керування розвитком мереж включає: оптимальне планування розвитку електричних мереж, що враховує прогнози енергоспоживання та технічні параметри; визначення оптимального місця розміщення підстанцій 110–35/10 кВ, з урахуванням густини населення та розвитку промисловості; вибір оптимальних параметрів і конфігурацій мереж напругою 35 – 110 кВ, з урахуванням технічних обмежень та оптимізації мережевої інфраструктури. Керування режимами роботи мережі є пряме та непряме. Заходи з прямого керування режимами: оптимізація місць розмикання мереж напругою 6 – 35 кВ для забезпечення ефективного управління завантаженням; оптимізація робочих напруг у центрах живлення радіальних мереж з метою збільшення ефективності передачі енергії; вимикання трансформаторів в режимах низьких завантажень на двотрансформаторних ТП для економії ресурсів; раціоналізація завантаження трансформаторів для оптимізації їх ефективності та тривалості служби. Непряме керування режимами включає наступні заходи: стимулювання встановлення пристроїв компенсації реактивної потужності для покращення коефіцієнта потужності; удосконалення систем обліку електроенергії для більш точного визначення втрат та ефективного контролю; покращення енергетичних показників електроенергетичного обладнання шляхом впровадження новітніх технологій та матеріалів.

В контексті ефективного керування споживачами, важливо впроваджувати ефективні стратегії, спрямовані на зменшення втрат електроенергії, зокрема, керуванням розвитком та керуваннями режимами роботи споживачів та заходи для забезпечення оптимального функціонування системи [4]. Заходи керування розвитком споживачів включають: оптимальне розміщення нових споживачів (застосування аналізу для ефективного розміщення нових споживачів у відповідності до попиту та інфраструктури; встановлення пристроїв компенсації реактивної потужності та засобів керування (застосування технологічних рішень для компенсації реактивної потужності та впровадження засобів керування для ефективного регулювання споживання); використання споживачів-регуляторів (впровадження і використання систем, що дозволяють споживачам активно регулювати своє споживання електроенергії відповідно до змін потреб та тарифів).

Керування режимами роботи споживачів має два напрямки – пряму та непряму. У прямій стратегія керування режимами роботи запропоновано наступні заходи: вимикання споживачів від шин центрів живлення (планування часу вимикання для оптимізації завантаження та зниження втрат); автономне і дистанційне керування споживачами-регуляторами (впровадження систем автоматизованого керування для ефективного взаємодії та керування споживачами); раціоналізація завантаження і експлуатації обладнання (покращення управління електричним обладнанням для забезпечення оптимального навантаження та тривалості служби).

Непряма стратегія заходів керування режимами роботи передбачає: встановлення пристроїв компенсації реактивної потужності у споживачів (застосування технологій компенсації реактивної потужності для поліпшення коефіцієнта потужності); застосування прогресивних норм електроспоживання (впровадження стандартів, що стимулюють раціональне споживання електроенергії); удосконалення енергетичних показників електрообладнання (використання новітніх технологій та матеріалів для покращення продуктивності та зменшення енерговитрат); удосконалення технологічних процесів (впровадження енергоефективних технологій для оптимізації виробничих процесів та зменшення енерговитрат); удосконалення системи обліку електроенергії (впровадження точних систем обліку для ефективного контролю за споживанням та виявленням можливих втрат).

Отже, можемо виділити:

1) заходи зі зниження технічних втрат:

- оптимізація діючих схем та режимів роботи мережі;
- вимикання трансформаторів, що працюють за сезонним графіком навантаження;
- компенсація реактивної потужності;
- заміна проводів на перевантажених лініях електропередачі;
- раціональне використання трансформаторів шляхом заміни перевантажених або недовантажених на трансформатори, що відповідають параметрам, встановленим умовами експлуатації;
- вирівнювання навантаження фаз на лініях 0,4 кВ;
- залучення до електричних мереж систем розподіленої генерації.

2) заходи зі зниження нетехнічних втрат:

- оснащення персоналу засобами виявлення поза облікового використання електричної енергії;
- ліквідація поза облікового використання електричної енергії;
- виявлення поза облікового та позадоговірного використання електричної енергії;
- модернізація засобів вимірювання електроенергії, у тому числі й заміна застарілих та зношених пристроїв обліку, використання Smart лічильників;
- залучення нових технологій та розробок для обліку, передачі та споживання електричної енергії;
- організація виносного обліку;
- встановлення обліку на границі балансової вартості;
- організація метрологічного забезпечення вимірювання, дослідження та розподілу електричної енергії.

Пріоритетним шляхом зниження технічних втрат є оптимізація режимів та модернізація електричних мереж. Стратегічним напрямком зниження комерційних втрат електричної енергії є вдосконалення систем обліку та захист даних систем від різних несанкціонованих входів іншими споживачами та користувачами електричною енергією на тих чи інших неправових засадах, що призводить до втрат енергії.

Так, важливим є вирівнювання графіка навантаження споживачів з метою покращення показників роботи міських мереж може включати [9]:

- перенесення часу роботи устаткування з денних або вечірніх годин на інші години, переважно нічні;
- відключення частини або всього навантаження споживачів в години максимуму;
- зменшення потужності встановленого обладнання зі збільшенням тривалості його роботи;
- застосування спеціальних споживачів-регуляторів, що працюють з примусовим графіком в нічні години.

Завпровадження та широкі можливості сучасних засобів АСКОЕ дозволяють успішно вирішувати проблеми інформаційного забезпечення задачі визначення та аналізу втрат електроенергії в розподільних електричних мережах 0,38 кВ [1, 3]. Включення задачі визначення технологічних втрат електроенергії в електромережах 0,38 кВ до переліку задач АСКОЕ робить баланс електроенергії в електричній мережі більш точним і прозорим.

Для уточнення і приведення у відповідність до реальних умов експлуатації створеної розрахункової схеми розподільної електричної мережі 0,38 кВ можливо і доцільно використовувати бази даних, що формуються засобами АСКОЕ. Врахування динаміки зміни конфігурації та параметрів електричної мережі 0,38 кВ в її розрахунковій схемі на звітному проміжку часу дозволяє оцінити вплив зміни експлуатаційних умов, в тому числі обмеження електроспоживання, на значення втрат електроенергії в електричних мережах.

### **3. Оцінка впливу нерівномірності генерації та споживання електроенергії на рівні витрат у електричній мережі**

Нерівномірність генерації та споживання електроенергії обумовлює додаткові втрати [1, 15 – 17], які при оптимізації режимів електромереж необхідно враховувати.

Впровадження сучасних методів і алгоритмів для створення систем вимірювання потужності наразі успішно розв'язується. Завдяки сучасному інформаційно-вимірювальному обладнанню значно зменшується інструментальна похибка інформаційних систем, доводячи її до попередньо визначених норм. Важливість визначення та належного відображення величин, які адекватно відображають обсяг енергоспоживання, виникає в різноманітних практичних випадках [18, 19]. Проте, зі зростанням нелінійних навантажень, традиційні методи вимірювання потужності стають менш точними у оцінці процесів в енергетичній системі [9]. Нелінійні навантаження, такі як силові електронні обладнання, частотно-регульовані приводи тощо, спотворюють криві напруги та струму, впливають на енергетичні характеристики та генерують вищі гармоніки, що потребують нарощування потужності системи. Зазвичай індукційні лічильники показують завищені значення при наявності вищих гармоній, що призводить до

похибок вимірювань. У сучасному контексті традиційні методи вимірювання потужності виявляються ненадійними для оцінки процесів у енергетичній системі. Виникає необхідність у нових підходах до вимірювання потужності та адекватної оцінки енергетичних процесів, зокрема, в розробці алгоритмів, які враховують нерівномірність генерації та споживання електроенергії в системі.

З метою зменшення втрат електроенергії шляхом аналізу потенціалу керування режимами в електроенергетичній системі запропоновано використати метод оцінки неоптимальних рівнів генерації та споживання електроенергії за допомогою реактивної потужності Фризе  $Q_\Phi$  [18].

Неоптимальність відбору від генератора та споживання навантаженнями електроенергії будемо оцінювати з точки зору роботи системи електропостачання в цілому. Як критерій оцінки виберемо ступінь відхилення від рівномірного енергоспоживання по відношенню до середнього рівня передачі активної потужності за заданий інтервал часу. З цією метою застосуємо реактивну потужність Фризе, розширивши її застосування, як квадратичної нев'язки між повною потужністю  $S$  та активною потужністю  $P$ , на довільний інтервал часу [18 – 20]. Потужність Фризе дозволяє оцінити неоптимальність передачі електроенергії, а отже й додаткових втрат. При деталізації втрат, зокрема причин їх зміни (зростання) важливим постає питання визначення винуватця появи чи зростання додаткових втрат. Найбільш укрупнено джерелом, яке сприяє появу додаткових втрат електроенергії може бути як генератор, так і навантаження, що особливо актуальним є для локальних електроенергетичних систем.

Визначення модифікованої потужності  $Q_\Phi$  для оцінки нерівномірності процесів у загальному вигляді покажемо на прикладі режиму, що характеризується діючими значеннями напруги  $U_i$  та струму  $I_i$ ,  $i = 1, \dots, n$ , де  $t_i$  – тривалість  $i$ -го інтервалу, та  $P = U_0 \cdot I_0$ , де  $U_0, I_0$  – усереднені значення напруги та струму. За умови  $\cos\phi = 1$  для інтервалу часу  $T$ , можна записати вираз для потужності Фризе  $Q_\Phi$  у вигляді [20]:

$$Q_\Phi = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^n U_i^2 \frac{t_i}{T}\right) \left(\sum_{j=1}^n I_j^2 \frac{t_j}{T}\right) - U_0^2 I_0^2}, \quad (4)$$

який при умовах  $\delta_i = \Delta t_i / T$ ;  $\sum_{i=1}^n \delta_i = 1$  набуває вигляду:

$$Q_\Phi = \sqrt{\sum_{i=1}^n U_i^2 \delta_i \cdot \sum_{i=1}^n I_i^2 \delta_i - \left(\sum_{i=1}^n U_i I_i \delta_i\right)^2}. \quad (5)$$

Виділимо два інтервали тривалістю  $\Delta t_1$  та  $\Delta t_2$ .

Задамо середні (діючі) значення постійної напруги та струму:

$$U_0 = U_1 \delta_1 + U_2 \delta_2; \quad I_0 = I_1 \delta_1 + I_2 \delta_2. \quad (6)$$

Задаємо  $\Delta U_1, \Delta I_1$  з (14) та знаходимо  $\Delta U_2$  та  $\Delta I_2$  при умові:

$$U_1 = U_0 + \Delta U_1; \quad U_2 = U_0 - \Delta U_2. \quad (7)$$

$$I_1 = I_0 + \Delta I_1; \quad I_2 = I_0 - \Delta I_2. \quad (8)$$

В залежності від режимів роботи системи можливі випадки:

1)  $U_1/U_2 \neq I_1/I_2$  – нерівномірна зміна режимів роботи електромережі;

2)  $U_1/U_2 = I_1/I_2 = \alpha$  – пропорційна зміна напруги та струму; виконання умови

$U_1/I_1 = U_2/I_2 = \text{const} = R_{EQ}$  – еквівалентний опір навантаження є постійним;

3)  $U_1 \cdot I_1 = U_2 \cdot I_2 = \text{const} = P_0$  – передача постійної потужності.

Для 1-го випадку величину  $Q_\Phi$  (із співвідношення (5)) можемо записати як

$$Q_\Phi^2 = \delta_1 \delta_2 [(U_0 + \Delta U_1) \times (I_0 - \Delta I_2) - (U_0 - \Delta U_2)(I_0 + \Delta I_1)]^2 \quad (9)$$

Розглянемо складову правої частини співвідношення (9):

$$[(U_0 + \Delta U_1) \times (I_0 - \Delta I_2) - (U_0 - \Delta U_2)(I_0 + \Delta I_1)] = A$$

$$\begin{aligned} A &= (U_0 + \Delta U_1) \times (I_0 - \Delta I_2) - (U_0 - \Delta U_2)(I_0 + \Delta I_1) = \\ &= U_0 I_0 - U_0 \Delta I_2 + \Delta U_1 I_0 - \Delta U_1 \Delta I_2 - U_0 I_0 - U_0 \Delta I_1 + \Delta U_2 \Delta I_1 = \\ &= -U_0 (I_1 - I_2) + I_0 (U_1 - U_2) - \Delta U_1 \Delta I_1 + \Delta U_2 \Delta I_1 = \\ &= -U_0 (\Delta I_1 + \Delta I_2) + I_0 (\Delta U_1 + \Delta U_2) - \Delta U_2 \Delta I_1 + \Delta U_2 \Delta I_2. \end{aligned}$$

При  $U_1 = U_2$  вираз (9) можна записати у вигляді:

$$Q_\phi^2 = \delta_1 \delta_2 [U_1 \times (I_0 - \Delta I_2) - U_1 \times (I_0 + \Delta I_1)]^2 = U_1^2 \delta_1 \delta_2 \times (-I_2 - \Delta I_1)^2 = U_1^2 \delta_1 \delta_2 (\Delta I_1 + I_2)^2. \quad (10)$$

Аналогічно при  $I_1 = I_2$  вираз (6) можемо представити як:

$$Q_\phi^2 = I_1^2 \delta_1 \delta_2 (\Delta U_1 + \Delta U_2)^2. \quad (11)$$

Введемо позначення:

$$K_{u1} = \frac{\Delta U_1}{U_0}; K_{u2} = \frac{\Delta U_2}{U_0}; K_{i1} = \frac{\Delta I_1}{I_0}; K_{i2} = \frac{\Delta I_2}{I_0}.$$

Вираз  $A$  визначається як:

$$A = U_0 I_0 [-(K_{i1} + K_{i2}) + (K_{u1} + K_{u2}) - K_{u1} K_{i2} + K_{u2} K_{i1}]. \quad (12)$$

Розглянемо особливості розрахунку  $Q_\phi$  із введеними показниками  $K_{u1}, K_{u2}, K_{i1}, K_{i2}$  :

$$Q_\phi^2 = \delta_1 \delta_2 U_0^2 I_0^2 [-(K_{i1} + K_{i2}) + (K_{u1} + K_{u2}) - K_{u1} K_{i2} + K_{u2} K_{i1}]^2. \quad (13)$$

Формула (13) визначає загальний вплив факторів при наявності двох інтервалів.

Нехай  $\Delta U_1 \cdot \Delta I_2 \approx \Delta U_2 \cdot \Delta I_1$ . Тоді

$$Q_\phi^2 = \delta_1 \delta_2 \cdot (U_0^2 I_0^2) \cdot [-(K_{i1} + K_{i2}) + (K_{u1} + K_{u2})]^2. \quad (14)$$

При умові  $\delta_1 = \delta_2 = \frac{1}{2}$ :

$$Q_\phi^2 = \frac{U_0^2 I_0^2}{4} \cdot [-(K_{i1} + K_{i2}) + (K_{u1} + K_{u2})]^2. \quad (15)$$

Нехай:  $K_{i2} = K_{i1} \cdot \alpha_i, K_{u2} = K_{u1} \cdot \alpha_u$ . Тоді отримаємо вираз:

$$Q_\phi^2 = \delta_1 \delta_2 \cdot (U_0^2 I_0^2) \cdot [-K_{i1} (K_{i1} \cdot \alpha_i) + K_{u1} (K_{u1} + \alpha_u)]^2. \quad (16)$$

Оскільки  $P_0 = U_0 \cdot I_0$ , то можемо записати:

$$\left(\frac{Q_\phi}{P_0}\right)^2 = \frac{Q_\phi^2}{(U_0 I_0)^2} = \delta_1 \delta_2 [-(K_{i1} + K_{i2}) + (K_{u1} + K_{u2}) - K_{u1} K_{i2} + K_{u2} K_{i1}]^2. \quad (17)$$

Не важко показати, що для другого та третього випадку режимів роботи має місце  $Q_\phi = 0$ :

– другий випадок:

$$\begin{aligned} Q_\phi^2 &= (U_1^2 \delta_1 + U_1^2 \alpha^2 \delta_2) \times (I_1^2 \delta_1 + I_1^2 \alpha^2 \delta_2) - (U_1 I_1 \delta_1 + U_1 I_1 \alpha^2 \delta_2) = \\ &= U_1^2 (\delta_1 + \alpha^2 \delta_2) \times I_1^2 (\delta_1 + \alpha^2 \delta_2) - U_1^2 I_1^2 (\delta_1 + \alpha^2 \delta_2)^2 = 0; \end{aligned} \quad (18)$$

– третій випадок:

$$Q_\phi^2 = (U_1^2 \delta_1 + U_1^2 \delta_2) \times (I_1^2 \delta_1 + I_1^2 \delta_2) - (U_1 I_1 \delta_1 + U_1 I_1 \delta_2)^2 = \delta_1 \delta_2 (U_1 I_2 - U_2 I_1)^2 = 0. \quad (19)$$

Задамо параметри  $U_0 = 100$  В;  $I_0 = 100$  А. На рис. 1 представлені два сімейства графіків згідно залежності (17) при впливі зміни діючого значення напруги та струму на зміну потужності Фризе  $Q_\phi$  при зміні параметрів струму та напруги. Зростання параметрів струму та напруги при сталому значенні  $\delta$  призводить до відповідного зростання показника  $\frac{Q_\phi}{P_0}$  та  $\left(\frac{Q_\phi}{P_0}\right)^2$  в середньому, спостерігається, що зв'язок є нелінійним. Зростання на обох графіках розпочинається приблизно від значення  $\delta = 0,6$  до  $0,8$ .

Розглянемо режим споживання електроенергії при виділенні трьох різних інтервалів ( $n = 3$ ) при умові  $\delta_1 + \delta_2 + \delta_3 = 1$ :

$$Q_\phi^2 = \sum_{j=1}^n U_j^2 \delta_j \cdot \sum_{j=1}^n I_j^2 \delta_j - \left(\sum_{j=1}^n U_j I_j \delta_j\right)^2. \quad (20)$$

Для цього випадку середнє значення напруги  $U_0$  та середнє значення струму  $I_0$  виражаються наступним чином:

$$U_0 = U_1\delta_1 + U_2\delta_2 + U_3\delta_3; \quad (21)$$

$$I_0 = I_1\delta_1 + I_2\delta_2 + I_3\delta_3. \quad (22)$$

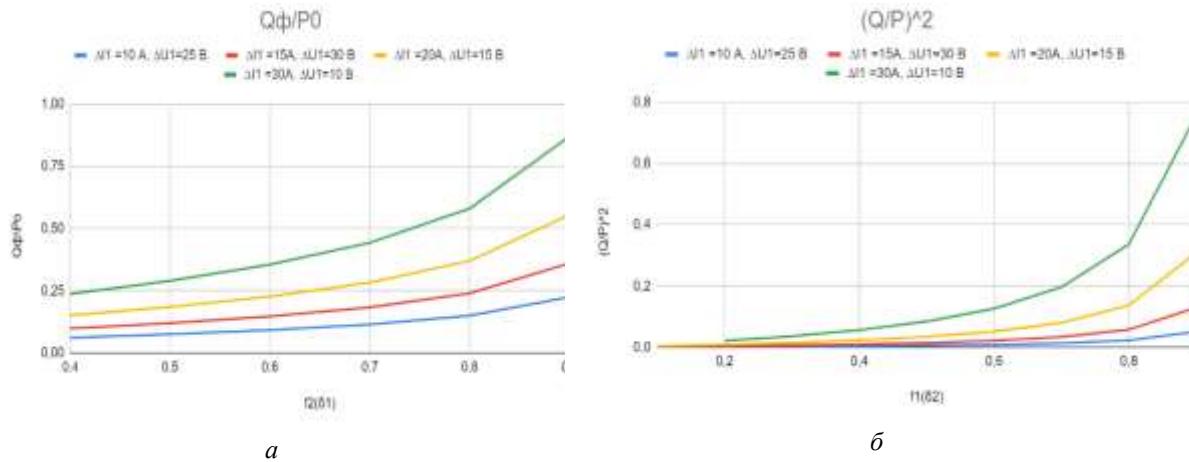


Рисунок 1 – Вплив зміни середнього (діючого) значення постійної потужності на зміну потужності Фризе  $Q_\phi$  при зміні параметрів струм та напруга

Розглянемо випадок, коли на деякому інтервалі споживання змінились напруга та струм у розмірі  $\Delta U$  та  $\Delta I$  відповідно, прийнявши значення:

$$\Delta U_1 = U_1 - U_0; \quad \Delta U_2 = U_0 - U_2; \quad \Delta U_3 = U_3 - U_0; \quad \Delta I_1 = I_1 - I_0; \quad \Delta I_2 = I_0 - I_2; \quad \Delta I_3 = I_3 - I_0.$$

Знайдемо значення коефіцієнтів спотворення через  $\Delta U$  та  $\Delta I$  на інтервалах споживання:

$$K_{u1} = \frac{\Delta U_1}{U_0}; \quad K_{u2} = \frac{\Delta U_2}{U_0}; \quad K_{u3} = \frac{\Delta U_3}{U_0}; \quad K_{i1} = \frac{\Delta I_1}{I_0}; \quad K_{i2} = \frac{\Delta I_2}{I_0}; \quad K_{i3} = \frac{\Delta I_3}{I_0}.$$

Запишемо значення для неактивної потужності Фризе (20), використавши (21), (22):

$$Q_\phi^2 = (U_1\delta_1 + U_2\delta_2 + U_3\delta_3) \cdot (I_1^2\delta_1 + I_2^2\delta_2 + I_3^2\delta_3) - (U_1I_1\delta_1 + U_2I_2\delta_2 + U_3I_3\delta_3)^2. \quad (23)$$

$$Q_\phi^2 = (U_1^2\delta_1 + U_2^2\delta_2 + U_3^2\delta_3) \cdot (I_1^2\delta_1 + I_2^2\delta_2 + I_3^2\delta_3) - (U_1I_1\delta_1 + U_2I_2\delta_2 + U_3I_3\delta_3)^2. \quad (24)$$

Розкриємо дужки виразу (24):

$$Q_\phi^2 = [U_1^2I_1^2\delta_1^2 + U_2^2I_1^2\delta_2^2 + U_3^2I_1^2\delta_3^2 + U_2^2I_2^2\delta_2^2 + U_1^2I_2^2\delta_1\delta_2 + U_3^2I_3^2\delta_3^2 + U_1^2I_3^2\delta_1\delta_3 + U_2^2I_3^2\delta_2\delta_3] - [U_1^2I_1^2\delta_1^2 + U_2^2I_1^2\delta_2^2 + U_3^2I_3^2\delta_3^2 + 2U_1I_1\delta_1 \cdot U_2I_2\delta_2 + 2U_1I_1\delta_1 \cdot U_3I_3\delta_3 + 2U_2I_2\delta_2 \cdot U_3I_3\delta_3]. \quad (25)$$

Спростимо отриманий вираз:

$$Q_\phi^2 = U_2^2I_1^2\delta_1\delta_2 + U_3^2I_1^2\delta_1\delta_3 + U_1^2I_2^2\delta_1\delta_2 + U_3^2I_2^2\delta_3\delta_2 + U_1^2I_3^2\delta_1\delta_3 + U_2^2I_3^2\delta_2\delta_3 - 2U_1I_1\delta_1 \cdot U_2I_2\delta_2 - 2U_1I_1\delta_1 \cdot U_3I_3\delta_3 - 2U_2I_2\delta_2 \cdot U_3I_3\delta_3. \quad (26)$$

Розділимо вираз (26) на складові  $A$ ,  $B$  та  $C$ :

$$\begin{aligned} A &= U_1I_2 - U_2I_1 = (U_0 + \Delta U_1) \cdot (I_0 + \Delta I_2) - (U_0 + \Delta U_2) \cdot (I_0 + \Delta I_1) = \\ &= -U_0(\Delta I_1 + \Delta I_2) + I_0(\Delta U_1 + \Delta U_2) - \Delta U_1\Delta I_1 + \Delta U_2\Delta I_2 = \\ &= U_0I_0 [-(K_{i1} + K_{i2}) + (K_{u1} + K_{u2}) - K_{u1}K_{i2} + K_{u2}K_{i1}] \\ B &= U_1I_3 - U_3I_1 = (U_0 + \Delta U_1) \cdot (I_0 + \Delta I_3) - (U_0 + \Delta U_3) \cdot (I_0 + \Delta I_1) = \\ &= U_0(\Delta I_3 - \Delta I_1) + I_0(\Delta U_1 + \Delta U_3) - \Delta U_1\Delta I_3 + \Delta U_3\Delta I_1 = \\ &= U_0I_0 [-(K_{i3} + K_{i1}) + (K_{u1} + K_{u3}) - K_{u1}K_{i3} + K_{u3}K_{i1}] \\ C &= U_3I_2 - U_2I_3 = (U_0 + \Delta U_3) \cdot (I_0 + \Delta I_2) - (U_0 + \Delta U_2) \cdot (I_0 + \Delta I_3) = \\ &= -U_0(\Delta I_3 - \Delta I_2) + I_0(\Delta U_3 + \Delta U_2) - \Delta U_3\Delta I_2 + \Delta U_2\Delta I_3 = \\ &= U_0I_0 [-(K_{i3} + K_{i2}) + (K_{u3} + K_{u2}) - K_{u3}K_{i2} + K_{u2}K_{i3}] \end{aligned} \quad (27)$$

Приймаємо  $\Delta U_1 \Delta I_2 \approx \Delta U_2 \Delta I_1$ ;  $\Delta U_3 \Delta I_2 \approx \Delta U_2 \Delta I_3$ ;  $\Delta U_1 \Delta I_3 \approx \Delta U_3 \Delta I_1$ :

$$A = U_0 I_0 [-(K_{i1} + K_{i2}) + (K_{u1} + K_{u2})];$$

$$B = U_0 I_0 [(K_{i3} + K_{i1}) + (K_{u1} - K_{u3})];$$

$$C = U_0 I_0 [-(K_{i3} + K_{i2}) + (K_{u3} + K_{u2})].$$

Тоді отримаємо:

$$Q_\phi^2 = \delta_1 \delta_2 U_0^2 I_0^2 [-(K_{i1} + K_{i2}) + (K_{u1} + K_{u2}) - K_{u1} K_{i2} + K_{u2} K_{i1}]^2 + \delta_1 \delta_3 U_0^2 I_0^2 [(K_{i3} + K_{i1}) + (K_{u1} + K_{u3}) - K_{u1} K_{i3} + K_{u3} K_{i1}]^2 + \delta_1 \delta_3 U_0^2 I_0^2 [-(K_{i3} + K_{i2}) + (K_{u3} + K_{u2}) - K_{u3} K_{i2} + K_{u2} K_{i3}]^2 \quad (28)$$

Формула (28) визначає загальний вплив факторів при наявності трьох інтервалів. Як видно, характеристики вплив зміни рівнів генерації та споживання є однотипними.

Спростимо вираз (28):

$$\frac{Q_\phi^2}{P_0^2} = \frac{Q_\phi^2}{U_0^2 I_0^2} = \delta_1 \delta_2 [-(K_{i1} + K_{i2}) + (K_{u1} + K_{u2}) - K_{u1} K_{i2} + K_{u2} K_{i1}]^2 + \delta_1 \delta_3 [-(K_{i3} + K_{i1}) + (K_{u1} - K_{u3}) - K_{u1} K_{i3} + K_{u3} K_{i1}]^2 + \delta_2 \delta_3 [-(K_{i3} + K_{i2}) + (K_{u3} + K_{u2}) - K_{u3} K_{i2} + K_{u2} K_{i3}]^2 \quad (29)$$

$$\frac{Q_\phi}{P_0} = \sqrt{\delta_1 \delta_2 [-(K_{i1} + K_{i2}) + (K_{u1} + K_{u2}) - K_{u1} K_{i2} + K_{u2} K_{i1}]^2 + \delta_1 \delta_3 [-(K_{i3} + K_{i1}) + (K_{u1} - K_{u3}) - K_{u1} K_{i3} + K_{u3} K_{i1}]^2 + \delta_2 \delta_3 [-(K_{i3} + K_{i2}) + (K_{u3} + K_{u2}) - K_{u3} K_{i2} + K_{u2} K_{i3}]^2} \quad (30)$$

За результатами попередніх розрахунків при  $\delta_1 \neq \delta_2$  для змінної  $\Delta U_1$  побудуємо сімейство графіків в залежності від  $\delta_1$ , коли  $\Delta I_1$  є параметром, що змінюється.

Побудуємо сімейство графіків при значенні  $\Delta U_1 = 50, 75, 100$  та  $125$  В та при зміні значення  $\Delta I_1 = 5, 10, 15, 20, 25, 30$  А (див. рис. 2 – 5).

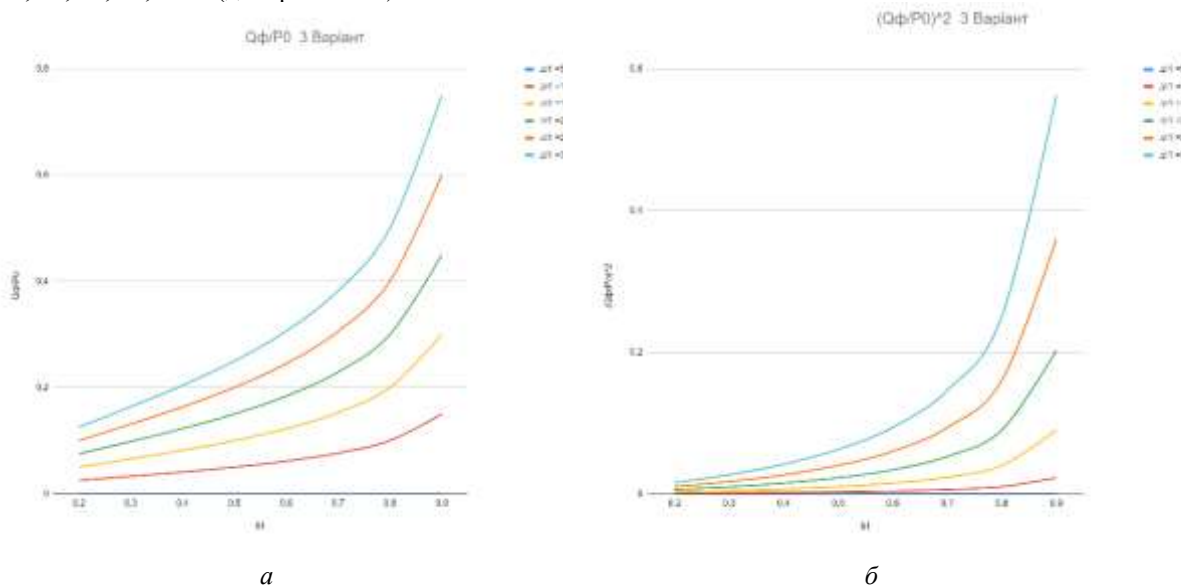


Рисунок 2 – Сімейство графіків при значенні  $\Delta U_1 = 50$  В; та при зміні значення  $\Delta I_1 = 5, 10, 15, 20, 25, 30$  А.

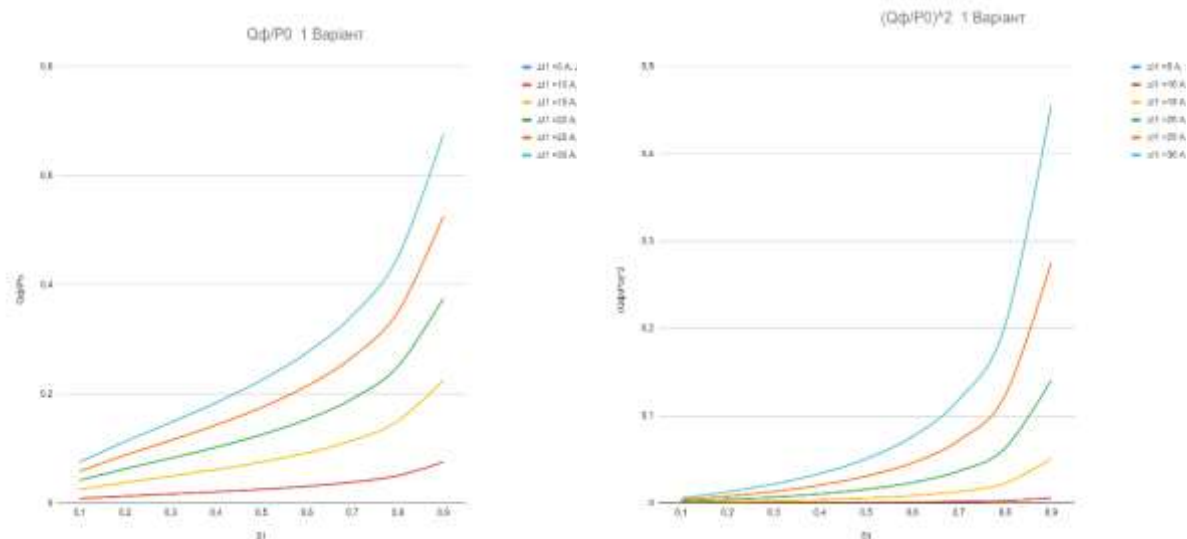
Із графіків на рис. 2–5 помітно суттєве зростання функцій  $\frac{Q_\phi}{P_0}$  та  $(\frac{Q_\phi}{P_0})^2$  на проміжку значення  $\delta$  від 0,7 до 0,9, також на зростання графіків впливає збільшення параметрів  $\Delta U_1$  та  $\Delta I_1$ .

Проведений аналіз дозволяє запропонувати алгоритм оцінки рівня оптимальності ведення режимів в електричних мережах, який може бути реалізованим як із залученням диспетчера, так і в автоматичному режимі. Алгоритм передбачає наступну сукупність кроків:

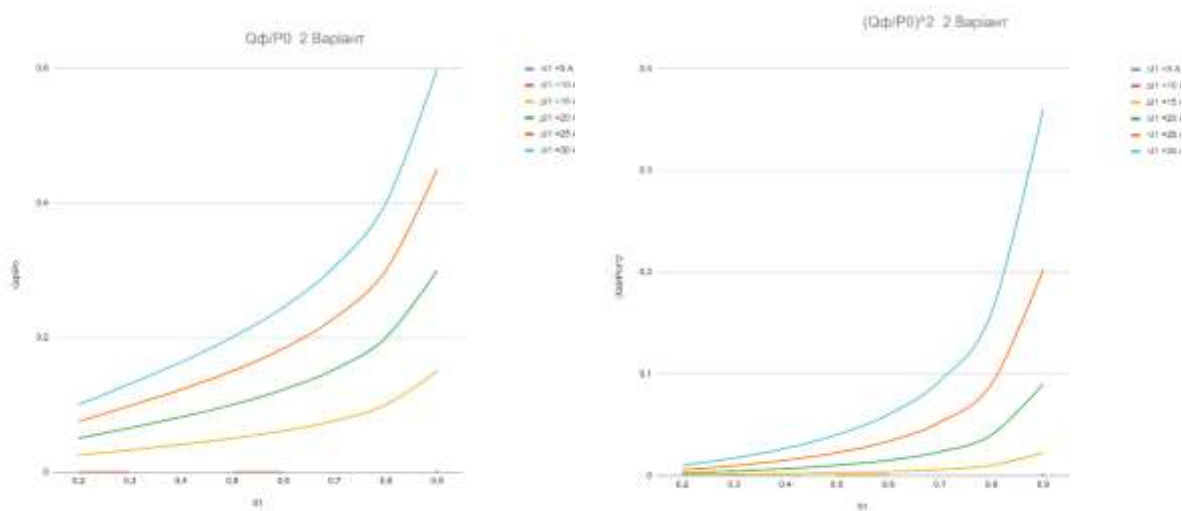
1. Аналіз поточного стану (визначення величин  $U_1$  та  $I_1$ ).
2. Оцінка приростів  $\Delta U$  та  $\Delta I$  при зміні режиму електромережі ( $U_2 = U_1 + \Delta U$  та  $I_2 = I_1 + \Delta I$ ).
3. Визначення ретроспективного ( $t_1$ ) та прогнозного ( $t_2$ ) інтервалу часу ( $\delta_1 = t_1 / (t_1 + t_2)$  та  $\delta_2 = t_2 / (t_1 + t_2)$ ;  $\delta_1 + \delta_2 = 1$ ).



4. Оцінка значень показників  $Q_\Phi$ ,  $\frac{Q_\Phi}{P_0}$  та  $(\frac{Q_\Phi}{P_0})^2$  для виділених двох інтервалів  $\delta_1$  та  $\delta_2$ .
5. Співставлення прогнозного значення показників  $Q_\Phi$ ,  $\frac{Q_\Phi}{P_0}$  та  $(\frac{Q_\Phi}{P_0})^2$  для виділеного прогнозного значення інтервалу  $t_2$  з їх допустимими значеннями  $U_{1,MAX}$  та  $I_{1,MAX}$ .
6. Побудова, при необхідності, залежності  $Q_\Phi = f_Q(\Delta U, \Delta I, t_1, t_2)$ , де  $U_1$  та  $I_1$  визначають початковий (базовий) режим.
7. Введення, при необхідності, коригувальних дій як в автоматичному режимі, так за участі диспетчера.



*а* *б*  
 Рисунок 3 – Сімейство графіків при значенні  $\Delta U_1 = 75$  В;  
 та при зміні значення  $\Delta I_1 = 5, 10, 15, 20, 25, 30$  А.



*а* *б*  
 Рисунок 4 – Сімейство графіків при значенні  $\Delta U_1 = 100$  В;  
 та при зміні значення  $\Delta I_1 = 5, 10, 15, 20, 25, 30$  А.

### Висновки

1. В статті здійснено аналіз рівнів неоптимальності режимів електричних мереж при нерівномірності генерації та споживанні електроенергії. Наведено оцінку впливу нерівномірності генерації та споживання електроенергії на рівні втрат у електромережах. З метою зменшення втрат електроенергії шляхом аналізу потенціалу керування режимами в електроенергетичній системі запропоновано використати метод оцінки неоптимальних рівнів генерації та споживання електроенергії за допомогою реактивної потужності Фризе  $Q_\Phi$ .

2. Неоптимальність відбору від генератора та споживання навантаженнями електроенергії оцінено з точки зору роботи електроенергетичної системи в цілому. Як критерій оцінки вибрано ступінь відхилення від рівномірного енергоспоживання по відношенню до середнього рівня передачі активної потужності за заданий інтервал часу. При цьому реактивна потужність Фризе  $Q_{\Phi}$  використовується для порівняння реального режиму роботи електроенергетичної системи з оптимальним (можливим) режимом. Використання  $Q_{\Phi}$  дозволило уніфікувати аналіз процесів енергозабезпечення навантажень електроенергетичної системи, забезпечує можливість ретроспективного, поточного і перспективного аналізу.

3. Запропоновано алгоритм оцінки рівня оптимальності ведення режимів в електричних мережах, який реалізує оцінку поточного стану мережі та можливі впливи відхилень рівнів напруги та струму на прогнозованому періоді та може бути реалізованим як із залученням диспетчера, так і в автоматичному режимі.

4. Особливої актуальності набуває оцінка адресного впливу на основі потужності Фризе для локальних електроенергетичних систем, де широко застосовуються різні типи генераторів обмеженої потужності на основі відновлюваної енергії та різноманітні типи технологій енергоспоживання.

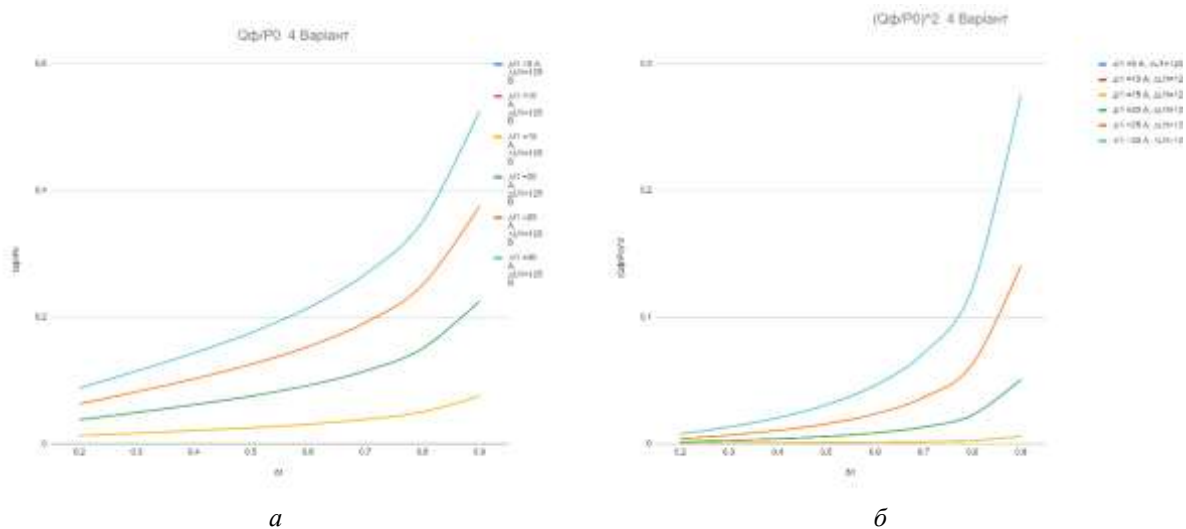


Рисунок 5 – Сімейство графіків при значенні  $\Delta U_1 = 125 \text{ В}$ ; та при зміні значення  $\Delta I_1 = 5, 10, 15, 20, 25, 30 \text{ А}$ .

#### Список використаної літератури

1. Лежнюк П.Д., Кулик В.В., Пашенко А.В. Розрахунок втрат електроенергії в електричних мережах 0,38 кВ з використанням АСКОЕ. *Вісник Приазовського державного технічного університету*. 2005. № 15. С. 36–40.
2. Скрипник С.О., Шеїна Г.О. Порівняння технологічних втрат електричної мережі 6(10) кВ та 20 кВ. *Наукові праці ДонНТУ. Серія: «Електротехніка і енергетика»*. 2020. №1(22). С. 21–26.
3. Красовський Ю.Л., Кулик В.В., Лежнюк П.Д. Керування втратами електроенергії в розподільних мережах з використанням засобів АСКОЕ. *Вісник Харківського держ. техн. ун-ту сільського господ.* 2003. Вип. 19. Т.1. С. 99–107.
4. Ципленков Д.В., Красовський П.Ю. Методи та засоби зниження технічних втрат електроенергії в елементах систем електропостачання. *Електротехніка та електроенергетика*. 2015. № 1. С. 77–82.
5. Gupta J.V. A course in power systems. S. K. Kataria & Sons, New Delhi. 2008.
6. Wadwah C.L., 2006. Electric Power System, [online] Chennai, New Age International. Available at: <http://kulykvv.vk.vntu.edu.ua/file/posibn/115c6fbdb6a652a204c3d43989540d1c.pdf> [Accessed 01 February 2024].
7. Железко Ю.С. Методы расчета технических потерь электроэнергии в сетях 380/220 В. *Электрические станции*. 2002. №1. С. 14–20.
8. Довгань П. І. Аналіз втрат електроенергії в електричних мережах / П.І. Довгань, Е.І. Олашин, А.О. Кукуруза. *X I Міжнародна науково-практична конференція молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій»*. 7–8 грудня 2022 року. Тернопіль: ТНТУ. 2022. С. 65–66.
9. Маляренко В.А., Щербак І.Є., Колотило І.Д. Економія електроенергії і зниження втрат в електричних мережах. *Енергозбереження. Енергетика. Енергоаудит*. 2012. № 8(102). С. 9–14.

10. <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0399732-13#Text>. – Методичні рекомендації визначення технологічних витрат електричної енергії в трансформаторах і лініях електропередавання
11. Правила улаштування електроустановок. Міненерговугілля України. Харків: Видавництво «Форт». 2017. 760 с.
12. Denysiuk S., Derevianko D., Bielokha H., Zaichenko S. Evaluation of Energy Processes in Smart Monitoring Systems of Local Electricity Systems. *2023 IEEE 5th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES)*. Kremenchuk, Ukraine. 2023, pp. 1–4, doi: 10.1109/MEES61502.2023.10402488.
13. <https://hub.kyivstar.ua/articles/smart-metering>
14. <https://ua.reallin.net/news/what-are-electronic-energy-meters-and-smart-en-58527277.html>
15. Денисюк С.П., Опришко В.П. Оцінка нерівномірності споживання та генерації електричної енергії в локальних електроенергетичних системах. *Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України*. 2017. №48. С. 43–51.
16. Денисюк С.П., Базюк Т.М. Аналіз впливу нерівномірності споживання електроенергії. *Східно-Європейський журнал передових технологій*. 2013. № 4/8 (64). С. 9–13.
17. Денисюк С.П., Дерев'яно Д.Г., Колесник П.С. Оптимізація режимів електропостачання в локальних системах з розосередженою генерацією. *Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. Спец. випуск. Ч. 2. ІЕД НАНУ*. 2011. С. 30–36.
18. Денисюк С.П. Аналіз та оптимізація енергопроцесів у розосереджених електроенергетичних системах. *Технічна електродинаміка*. 2016. № 4. С. 62–64.
19. Жаркін А.Ф., Денисюк С.П., Попов В.А. Системи електропостачання з джерелами розосередженої генерації. *Київ: Наукова думка*. 2017. 230 с.
20. Denysiuk S., Basok B., Opryshko V. Optimization of Energy Processes in Local Power Supply Systems with Variable Operating Modes. *Power Systems Research and Operation Studies in Systems*. Decision and Control Springer International Publishing. 2022, с. 133–157.

**K. Hilevich<sup>1</sup>**, Ph. D. student, ORCID 0000-0001-9074-0683

<sup>1</sup>**National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”**

## **ANALYSIS OF THE LEVELS OF NON-OPTIMALITY MODES OF LOW-VOLTAGE ELECTRICAL NETWORKS WITH UNEVENNESS OF ELECTRICITY GENERATION AND CONSUMPTION**

*An analysis of the levels of non-optimality of electricity generation and consumption processes in low-voltage electrical networks with the unevenness of electricity generation and consumption was carried out. Measures to reduce electricity losses in such networks have been systematized. The assessment of the influence of uneven electricity generation and consumption on the level of costs in the electric network is given. To reduce electricity losses by analyzing the potential of managing power supply modes, it is proposed to use the method of assessing non-optimal levels of the local electric power system using the reactive power of Frize  $Q_F$ .*

*The non-optimality of selection from the generator and consumption of electricity loads is evaluated from the point of view of the operation of the electricity system as a whole. The degree of deviation from uniform energy consumption with the average level of active power transfer for a given time interval was chosen as an evaluation criterion. The power of Frize  $Q_F$  is used to compare the real mode of operation of the electric power system with the optimal mode. This calculation can cover any time. The use of  $Q_F$  made it possible to unify the analysis of energy supply processes of electric power system loads, providing the possibility of retrospective, current, and prospective analysis. The use of Frize  $Q_F$  power provides an opportunity to assess technical, economic, and technological factors, such as the influence of various factors on the appearance of additional electricity losses, and the stability and stability of the system when changing the operating modes of generators and loads.*

*The conducted analysis made it possible to propose an algorithm for assessing the level of optimality of mode management in electrical networks, which can be implemented both with the involvement of a dispatcher and in automatic mode. The evaluation of the addressable impact based on the Frize power is of particular relevance for local electric power systems, where various types of generators of limited power based on renewable energy and various types of energy consumption technologies are widely used.*

**Keywords:** power grids, modes of operation of generators and loads, evaluation of the optimality level of processes, electricity losses, Frize power, and targeted influence.

#### References

1. Lezhniuk P., Kulyk V., Pashenko A. Calculation of electricity losses in 0.38 kV electrical networks using ASCOE. *Bulletin of Priazovsky State Technical University*. 2005. No. 15. Pp. 36–40.
2. Skrypnik S., Sheina G. Comparison of technological losses of 6(10) kV and 20 kV power grids. *Scientific works of DonNTU. Series: "Electrical Engineering and Power Engineering"*. 2020. №1(22). Pp. 21–26.
3. Krasovskiy Y., Kulyk V., Lezhniuk P. Management of power losses in distribution networks using ASKOE tools. *Visnyk of the Kharkiv State Technical University of Agriculture*. 2003. Vol. 19/1. Pp. 99–107.
4. Tsyplenkov D., Krasovsky P. Methods and means of reducing technical losses of electricity in the elements of power supply systems. *Electrical Engineering and Electric Power Engineering*. 2015. № 1. Pp. 77–82.
5. Gupta J.B. A course in power systems. S. K. Kataria & Sons, New Delhi. 2008.
6. Wadwah C.L., 2006. Electric Power System, [online] Chennai, New Age International. Available at: <http://kulykvv.vk.vntu.edu.ua/file/posibn/115c6fbdb6a652a204c3d43989540d1c.pdf> [Accessed 01 February 2024].
7. Zhelezko Y. Methods of calculation of technical power losses in 380/220 V networks. *Electric power stations*. 2002. №1. Pp. 14–20.
8. Dovhan P., Olashyn E., Kukuruza A. Analysis of electricity losses in electrical networks. *X I International Scientific and Practical Conference of Young Scientists and Students "Actual Problems of Modern Technologies"*. 7-8 December 2022. TNTU. 2022. Pp. 65-66.
9. Malyarenko V., Shcherbak I., Kolotylo I. Saving electricity and reducing losses in electrical networks. *Energy saving. Energy. Energy Audit*. 2012. No. 8 (102). Pp. 9–14.
10. <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0399732-13#Text>. – Methodical recommendations for determining the technological costs of electrical energy in transformers and power transmission lines.
11. Rules for arranging electrical installations. Ministry of Energy and Coal of Ukraine. *Kharkiv: "Fort" Publishing House*. 2017. 760 p.
12. Denysiuk S., Derevianko D., Bielokha H., Zaichenko S. Evaluation of Energy Processes in Smart Monitoring Systems of Local Electricity Systems. *2023 IEEE 5th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES)*. Kremenichuk, Ukraine. 2023. Pp. 1–4, doi: 10.1109/MEES61502.2023.10402488.
13. <https://hub.kyivstar.ua/articles/smart-metering>
14. <https://ua.reallin.net/news/what-are-electronic-energy-meters-and-smart-en-58527277.html>
15. Denysiuk S., Opryshko V. Estimation of non-uniformity of consumption and generation of electric energy in local electric power systems. *Proceedings of the Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine*. 2017. No. 48. P. 43–51.
16. Denysiuk S., Bazyuk T. Analysis of the influence of unevenness of electricity consumption. *East European journal of advanced technologies*. 2013. No. 4/8 (64). Pp. 9–13.
17. Denysiuk S., Derevyanko D., Kolesnyk P. Optimization of power supply modes in local systems with distributed generation. *Proceedings of the Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine*. Part 2. IED of NASU. 2011. Pp. 30–36.
18. Denysiuk S. Analysis and optimization of energy processes in distributed power systems. *Technical electrodynamics*. 2016. No. 4. P. 62–64.
19. Zharkin A., Denysiuk S., Popov V. Power supply systems with distributed generation sources. *Kyiv: Naukova dumka*, 2017. 230 p.
20. Denysiuk S., Basok B., Opryshko V. Optimization of Energy Processes in Local Power Supply Systems with Variable Operating Modes. *Power Systems Research and Operation Studies in Systems*. Decision and Control Springer International Publishing. 2022. Pp. 133–157.

Надійшла: 27.03.2024

Received: 27.03.2024

## СПІВСТАВНИЙ АНАЛІЗ АЛГОРИТМІЧНОГО-ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ В СИСТЕМАХ ІЗ АКТИВНИМ СПОЖИВАЧАМИ З ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЮ ГЕНЕРАЦІЄЮ

*Розглянуто питання використання алгоритмічного та програмного забезпечення у контексті розвитку розумних мереж. Визначено, що системи накопичення енергії є ключовими елементами систем енергоменеджменту розумних спільнот, оскільки вони дозволяють зберігати енергію, що виробляється відновлюваними джерелами енергії (ВДЕ), а також компенсувати нерівномірність попиту на електроенергію. Проведено порівняльний аналіз різних стратегій для систем управління енергією, що об'єднує сонячні батареї та акумуляторні батареї.*

*Проведено аналіз основних стратегій управління енергією та визначено переваги та недоліки, які необхідно враховувати при їх виборі. Розглянуто концепцію Smart-інверторів та їх інтеграція у системах накопичення енергії. Наведено структуру гібридних систем накопичення енергії та основні ролі накопичення енергії. Показано економічні переваги впровадження Microgrid та Smart Grid у енергетиці. Запропоновано розробку інтегрованих стратегій управління системами накопичення енергії, які враховують всі аспекти виробництва, зберігання та розподілу електроенергії в розумних мережах, сприяючи сталому та ефективному використанню ресурсів.*

*Розглянуто основні моделі та фреймворки, які використовуються для моделювання енергетичних систем та визначено переваги та недоліки моделей які слід враховувати при дослідженні чітких питань у контексті розвитку систем енергоменеджменту.*

**Ключові слова:** системи накопичення енергії, Smart Grid, енергоменеджмент, відновлювальні джерела енергії, програмне забезпечення, енергетичні системи.

### Вступ

Управління енергією є важливим завданням для будь-якої країни чи організації. Воно дозволяє ефективно використовувати наявні енергетичні ресурси та забезпечити надійність та стабільність енергопостачання. Акумуляторні технології відіграють все більш важливу роль у системах управління енергією. Вони дозволяють зберігати енергію, що виробляється відновлюваними джерелами енергії (ВДЕ), а також компенсувати нерівномірність попиту на електроенергію. Сучасні стратегії управління енергією з використанням акумуляторних технологій можна розділити на кілька основних напрямків:

– використання акумуляторів для накопичення енергії ВДЕ. Це дозволяє нівелювати нерівномірність виробництва електроенергії з ВДЕ, яка є однією з їхніх основних проблем.

– використання акумуляторів для балансування енергосистеми. Це дозволяє компенсувати нерівномірність попиту на електроенергію, а також підтримувати стабільність частоти та напруги в електричній мережі.

– використання акумуляторів для забезпечення резервного електропостачання. Це дозволяє забезпечити надійність електропостачання в разі відключення основного джерела енергії.

Розвиток акумуляторних технологій та автоматизації управління енергією відкриває нові можливості для підвищення ефективності та надійності систем управління енергією.

Створення мікромереж (Microgrid, MG) стає все ефективнішим та популярнішим рішенням для забезпечення енергії споживачів, і це стає дедалі більш вагомим альтернативою традиційному підходу до розвитку енергосистем. Традиційний підхід ґрунтується на будівництві великих централізованих генераційних установок та електричних мереж [1].

Системи силової електроніки відіграють ключову роль у регулюванні енергії від систем накопичення енергії (ESS) і підключення до електричної мережі. Використання різних видів відновлювальних джерел енергії (ВДЕ) та механізмів управління попитом споживачів перекриває аспекти сторони управління попитом (Demand-Side Management, DSM) в середовищі енергетично самодостатніх систем (ESC), що базуються на технічних концепціях Microgrid або віртуальних електростанцій (VPP) [2].

MG підтримують гнучку, ефективну та безпечну електричну мережу, забезпечуючи зростаючу інтеграцію розподілених енергетичних ресурсів з інверторним інтерфейсом, включаючи диспетчеризовану генерацію, таку як мікротурбіни та паливні елементи, і недиспетчеризовану відновлювану генерацію, як-от фотоелектричні (PV) масиви та вітрові турбіни, серед інші технології.

Економічні переваги, які MG принесуть своїм учасникам, формуються на основі таких факторів [3, 4]: зниження витрат на придбання електроенергії та потужності на роздрібному ринку; зниження витрат на оплату послуг електричних мереж для транспорту електроенергії; зниження витрат на технологічне приєднання або збільшення приєднаної потужності; підвищення надійності електропостачання та зниження втрат від відключення електроенергії; поліпшення якості електроенергії та зниження втрат від впливу перепадів та стрибків напруги на чутливе обладнання.

Системи накопичення енергії – це корисні технології, які широко розроблені та застосовуються в системах електроенергії, а також у мережах розподілу електроенергії. Електророзподільні мережі часто встановлюють технології накопичення енергії малої ємності, такі як невеликі батареї. Технології зберігання зазвичай використовуються для управління енергією або покращення якості електроенергії. У додатках для управління енергією потрібні технології накопичення високої ємності та низької помірної реакції, такі як батареї та насосно-акумуляуючі пристрої. З іншого боку, для підвищення якості електроенергії часто застосовуються блоки швидкої реакції та малої ємності, такі як конденсатори та маховик.

Традиційно накопичення енергії відіграло три основні ролі [5]. По-перше, це може підвищити ефективність і зменшити витрати на електроенергію за рахунок енергетичного арбітражу, тобто шляхом зберігання енергії, отриманої в періоди непікової навантаження (коли вона дешевша), а потім її вивільнення в періоди максимального попиту на електроенергію (коли її ціна вища).

По-друге, накопичення енергії може підвищити стабільність і надійність електромережі шляхом надання критично важливих допоміжних послуг. Ці послуги зазвичай включають регулювання частоти мережі (також називається регулюванням частоти), керування напругою та резерв обертання. ESS можуть підтримувати мережу, забезпечуючи робочий (обертовий і некрутячий) резерв для регулювання короточасних випадкових коливань частоти під час нормальних умов експлуатації та швидкого реагування на надзвичайні ситуації.

По-третє, накопичення енергії може підвищити якість електроенергії в частині мережі. Якість електроенергії стала надзвичайно важливою для великої кількості чутливих галузей промисловості, користувачів складного обладнання та будівель внаслідок збільшення використання нелінійних навантажень у промисловості, комп'ютерах, що належать клієнтам, та інших електронних системах.

**Метою роботи** є проведення співставного аналізу використання алгоритмічного та програмного забезпечення для моделювання енергетичних систем та процесів із активним споживачем.

#### **Матеріал і результати дослідження**

Основна проблема полягає в тому, що електроенергія, вироблена сонячними або вітровими генераторами, змінюється в часі і сильно залежить від багатьох факторів, таких як місцевість і погодні умови, де встановлено джерела, характеристики генераторів енергії тощо. Спеціально для того, щоб впоратися з цією випадковою поведінкою вихідної потужності генераторів з відновлюваними джерелами енергії, системи зберігання енергії від акумуляторів (BESS) набувають все більшого значення в багатьох додатках експлуатації та управління енергетичними системами [6].

Коли енергія потрібна значною мірою, беручи до уваги час відгуку та швидкість розряду, найкращим рішенням для зберігання енергії в мікромережі є використання блоків HESS з різними характеристиками. Як перевага цього підходу, блоки зберігання можуть бути розподілені по мережі без необхідності підключення блоків до вузла. Це полегшує оновлення систем, які раніше включали ESS [7, 8].

Пропонується глобальна стратегія керування системою накопичування енергії. Вона має на меті забезпечити активні функції мережі спільноти, включаючи активну потужність і основний контроль реактивної потужності, що працює відповідно до заданих значень.

Сучасні системи накопичення є універсальними технологіями, оскільки вони дозволяють одночасне їх застосування для енергетичного арбітражу, при якому здійснюється закупівля е/е на ринку по низькій вартості та продаж її по високій; забезпечення достатності – перенесення виробленої е/е з часу піку сонячного випромінювання у час найбільших потреб ГЕН, для зниження навантаження на маневрені потужності в енергосистемі; регулювання частоти та активної потужності чи надання інших допоміжних послуг на ринку електроенергії [9].

Гнучкість великих енергосистем також буде визначатися гнучкістю електроенергетичних систем меншого рівня, або підсистем. У свою чергу, керування енергоспоживанням окремих споживачів, управління попитом мікрорайонів чи промислових вузлів має значний вплив на гнучкість електроенергетичних систем на регіональному та локальному рівнях [10]. Зокрема, гнучкість локальних електроенергетичних систем залежить від керованості розподіленою генерацією (ВДЕ), механізмів управління попитом, використання акумуляторів, впровадження механізмів гнучкості при прогнозуванні навантаження та застосування методів економічного аналізу.

Численні технології накопичення енергії, які зараз доступні на ринку для використання електроенергії та енергії, мають великий потенціал для підтримки різних додатків інтелектуальної мережі. Кожна технологія накопичення енергії здатна надавати набір серйозно важливих мережевих послуг на користь різних груп зацікавлених сторін, таких як оператори систем, комунальні підприємства та клієнти. Цінність усіх цих послуг суттєво змінюється залежно від місця розміщення ESS в електромережі та зацікавлених сторін.

Концепція 3D (Decarbonization, Decentralization, Digitalization) [11,12] надає найцілісніше уявлення про трансформацію енергетики. "Декарбонізація" передбачає перехід до екологічно чистої "безвуглецевої" економіки та енергетики, в якій збільшується роль відновлювальних джерел енергії, розширюється використання електричного транспорту, та відмова від використання вугільних палив. "Децентралізація" означає перехід до розподіленої електроенергетики з численними різнорівневими генераторами та споживачами. Це проявляється у збільшенні ролі розподільчих мереж, зокрема для невеликої та різноманітної генерації, і виникненні "активних споживачів" (професійних виробників і споживачів електроенергії), які можуть гнучко змінювати свій споживчий профіль з мережі.

Ця можливість для мікрогенерації в приватних домогосподарствах розширила діяльність споживачів електроенергії від простого придбання електроенергії у комунальних підприємств до більш активної участі у виробництві та зберіганні електроенергії [13]. Акумуляторні батареї в поєднанні з фотоелектричними установками можуть сприяти розвантаженню розподільчих мереж, якщо батареї експлуатуються з цією метою. Завдяки режиму роботи накопичувача, орієнтованому на мережу, максимальна потужність сонячної установки може бути знижена порівняно з аналогічним випадком без роботи накопичувача, орієнтованого на мережу.

Потенціал "Енергії як послуги" (EaaS) стає особливо великим у відношенні до інтелектуальної зарядки електромобілів (EV) та її інтеграції з системами керування енергією будинку (HEMS) [14]. Інтеграція даних електромобілів із тарифами за час використання та інформацією від Smart лічильників відкриває можливості для розумної зарядки, яка приносить користь як компанії та операторові електромережі, так і власнику транспортного засобу. Керуючи часом і швидкістю заряджання електромобіля з урахуванням місцевого попиту та цін на ринку електроенергії (при цьому дотримуючись мінімальних рівнів заряду, встановлених власником), компанія, яка спеціалізується на інтелектуальній зарядці, може відкривати нові джерела доходу, такі як надання послуг оператору мережі для балансування та участь у оптових арбітражних можливостях, заснованих на масових закупівлях електроенергії. Оператор мережі отримує можливість балансування локальної мережі з більшою гнучкістю, водночас як власник транспортного засобу отримує можливість дешево заряджати свій електромобіль без додаткових витрат.

Функції підтримки електроенергетичної системи від розумних інверторів, такі як компенсація реактивної потужності, утримання стабільності при збоях та підвищення якості електроенергії, разом із зрослими вимогами до надійності, є ключовими для подальшого зменшення загальних витрат на енергію.

Концепція розумних інверторів була акцентована в недавно розроблених стандартах інтерконекції децентралізованих генеруючих систем (DG) для досягнення плавної та придатної для мережі інтеграції великої кількості фотовольтаїчних систем та, взагалі, систем відновлюваної енергії. Розумні інвертори можуть надавати комплекс функцій підтримки електроенергетичної системи. Методи впровадження цих функцій досліджуються та тестуються на однофазній фотовольтаїчній системі, розроблені авторами. Експериментальні результати демонструють, що розумні інвертори із функціями підтримки електроенергетичної системи можуть надавати ресурси для зменшення проблем, створених високим проникненням фотовольтаїки в мережі.

Під час оптимізації управління енергією важливо враховувати багато обмежень. У реальних застосуваннях майже всі стратегії оптимізації для управління енергією включають ряд обмежень, які описують фізичні та економічні обмеження системи. Система повинна працювати в межах цих обмежень, щоб забезпечити економічну та стабільну експлуатацію. Наприклад, для гібридної сонячної електростанції максимальна потужність фотовольтаїчних батарей обмежена для виробництва сонячної енергії, а у батареї або інших систем зберігання енергії є обмеження ступеня розряду (SOC) та обмеження швидкості заряду/розряду. Крім того, деякі навантаження не можуть бути зміщені або зменшені, що створює обмеження щодо попиту. Експлуатаційні обмеження використовуються для обмежень швидкості наростання, балансу потужності, а також обмежень вимикання та запуску. Конвертери в гібридній сонячній системі також мають обмеження потужності, що означає, що в мережу та систему зберігання енергії може бути передано лише певну кількість енергії. При інтеграції дизель-генераторів вуглекислотні викиди також можуть бути обмеженням.

Стратегія системи управління енергією (EMS) є суттєвою в житлових застосуваннях через велику чутливість споживачів до витрат [15]. Різні стратегії EMS порівнюються з різних точок зору на основі реального комерційного продукту, що об'єднує сонячні батареї та батареї.

Стратегія 1: Максимальне власне споживання. У цьому режимі стратегія спрямована на максимізацію власного споживання hybrid PV–battery system (HPVBS). Блок-схема максимального власного споживання показана на рисунку 1, і принцип можна описати таким чином:

–Коли сонячного світла достатньо, фотоелектрична енергія спочатку покриває потребу в навантаженні, потім заряджає батарею і в останню чергу подається в мережу;

–Коли сонячного світла недостатньо, фотоелектрична енергія спочатку надходить до навантаження, а потім акумулятор розряджається. Дефіцит електроенергії (якщо такий є) означатиме, що електроенергія купується з мережі в останню чергу.

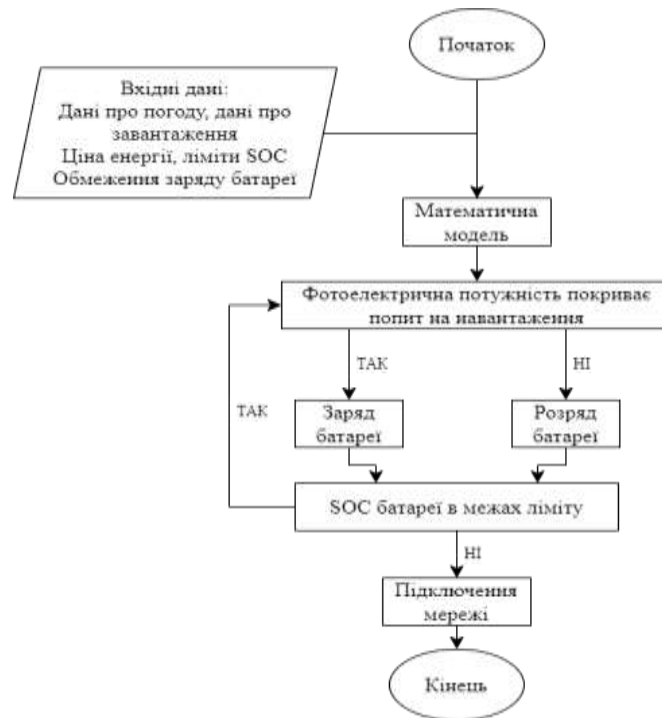


Рисунок 1 - Блок-схема стратегії максимального власного споживання.

Стратегія 2: час використання (TOU). У цьому режимі час заряду та період розряду потрібно встановити вручну або автоматично. Протягом одного дня може бути більше одного сегмента заряду/розряду, і кожен сегмент базується на годинах. Блок-схема цієї стратегії показана на рисунку 2, а принцип цього режиму описується так:

–Акумулятор не розряджається в період заряду і не заряджається в період розряду. Кожен часовий сегмент має бути встановлений як режим заряду або режим розряду;

–Протягом періоду заряду акумулятор заряджається до певного SOC. Мережа забезпечує енергію для покриття навантаження та зарядки акумулятора;

–Протягом періоду розряду фотоелектрична енергія та енергія батареї використовуються для покриття потреби навантаження. Коли фотоелектричної енергії недостатньо або батарея повністю розряджена, мережа забезпечує додаткову потужність для покриття навантаження.

Стратегія 3: Повна подача в мережу. Цей режим максимізує фотоелектричну енергію для підключення до мережі, і блок-схема показана на рисунку 3. Принцип можна коротко описати так:

–Коли генерована фотоелектрична енергія перевищує максимальну потужність інвертора, акумулятор заряджається для накопичення додаткової енергії;

–Коли генерована фотоелектрична енергія менша за максимальну потужність інвертора, батарея розряджається, щоб максимізувати вихідну енергію інвертора.

–Однак ці стратегії можуть мати досить різний економічний результат в домогосподарському випадку, що означає, що їх слід застосовувати в різних сценаріях. Зокрема, стратегія максимального споживання самої себе застосовується в областях, де ціна на електроенергію висока, і чим вища ринкова ціна, тим економічніше сценарій. Стратегія TOU застосовується в областях, де різниця між піковою та позапіковою ціною велика, оскільки в цьому режимі мережа заряджає батарею протягом позапікових періодів і розряджає під час пікових періодів, що покращує енергетичний обмін між HPVBS та мережею, і лише велика різниця в ціні може покрити витрати на заряджену енергію та знос батареї. Стратегія повного живлення мережі застосовується в сценаріях, де батарея повинна



підтримувати роботу мережі та працювати як резерв. У цьому випадку батарея працює при низькому рівні заряду.

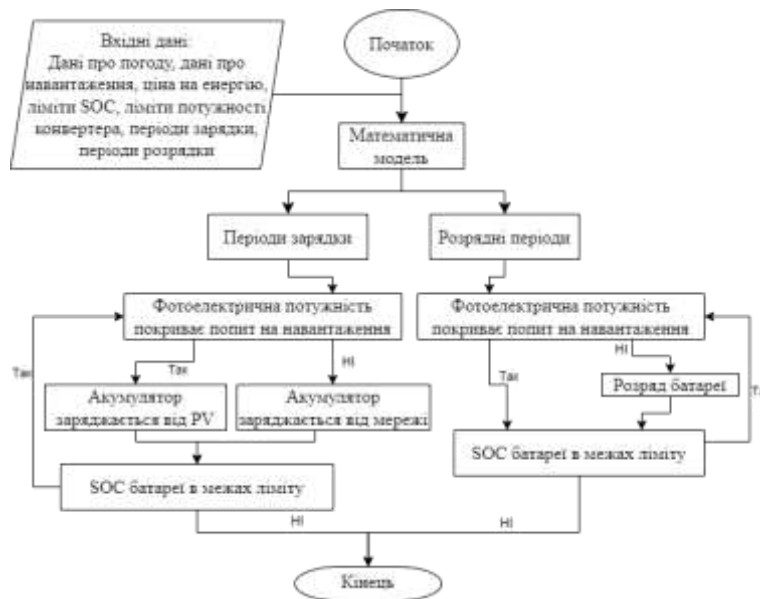


Рисунок 2 - Блок-схема стратегії часу використання.

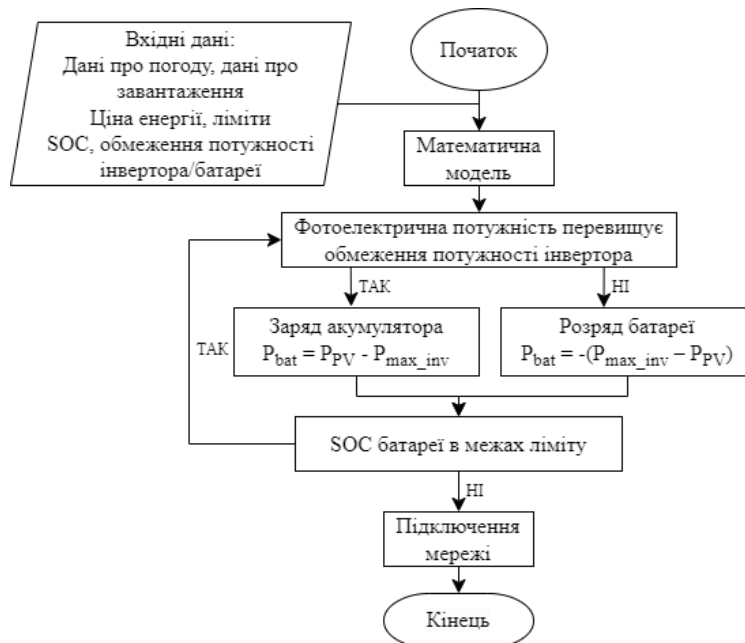


Рисунок 3 - Блок-схема стратегії повного підключення до мережі.

Система керування батареями (BMS) — це апаратно-програмне рішення, яке перевіряє правильну роботу батарей: у базовій версії вона просто заряджає батареї, коли вони розряджені, і розряджає їх, коли це необхідно. Він обмежує роботу батареї лише для їх захисту: перевищення обмежень мінімального та максимального стану заряду (SOC) і швидкі цикли заряджання/розряджання заборонені, щоб уникнути швидкого погіршення якості [16].

Система зберігання енергії, яка найбільше цікавить виробників сонячної фотоелектричної енергії, - це система зберігання енергії в батареях (Battery Energy Storage System, BESS), що вимагає ефективного керування та контролю [17]. Основні характеристики BESS включають:

1. Номінальну потужність.
2. Номінальну енергоємність.
3. Глибину розряду (Depth of Discharge, DOD).
4. Тривалість зберігання.

5. Життєвий цикл.  
 6. Стан заряду (State of Charge, SOC).  
 7. Двосторонню ефективність (відсоток електроенергії, яка поміщається в накопичувач і потім повертається).

8. Термін експлуатації.

9. Моніторинг і контроль безпеки.

Базова система керування акумулятором (BMS) дозволяє безпечно заряджати/розряджати акумулятори та живити навантаження. Батареї захищені, щоб уникнути швидкої деградації: мінімальний і максимальний рівень заряду (SOC) не перевищуються, а швидкі цикли заряджання/розряджання заборонені. Досконаліша BMS, підключена до фотоелектричного (PV) генератора, також може працювати з подвійною метою — захистити сховище та зменшити пікове споживання [16].

Фотоелектричні модулі підключені до пристрою відстеження точки максимальної потужності (MPPT), щоб працювати в точці максимальної потужності за будь-яких умов освітлення та температури. BMS вимірює постійний струм, напругу та температуру акумуляторів. SOC постійно обчислюється, щоб оцінити залишковий заряд накопичувача; таким чином BMS запобігає аномальному погіршенню якості акумуляторів через неоптимальні схеми заряджання, перезарядження, недозарядження та аномальні температури.

Генерація фотоелектричних панелей залежить від умов установки (розташування, нахил і азимут фотоелектричних модулів) і від погодних умов (сонячне випромінювання та температура). В таблиці 1 наведені основні символи які використовуються при виборі стратегій

Таблиця 1 - Основні символи які використовуються при виборі стратегій

$E_{batt,disch}$	енергія батареї, що подається на навантаження (кВт·год)
$E_{loads\_1day-ahead}$ , <b>6 a.m.–6 p.m.</b>	Очікувані навантаження на 1 день вперед у часовому інтервалі 6:00–18:00. (кВт*год)
$E_{load,TDT}$	розрахункові навантаження при загальному часі розряду (TDT) (кВт·год)
$P_{load,max}$	максимальна потужність навантаження, яку задовольняє мережа у разі стратегії зменшення пікових навантажень (кВт)
$R_{suff}$	параметр тимчасової самоокупності
$R_{thres}$	порогове значення для параметра $R_{suff}$

Після визначення загального часу розряду (TDT) процедура продовжується з другою частиною; тобто визначення стратегії управління сховищем. SOC розрахований на 18:00. BESS, яка використовує відповідні моделі, починаючи з вимірювання напруги та температури навколишнього середовища акумуляторів у реальному часі. Номінальна ємність накопичувача та SOC дозволяють розрахувати енергію, яку можна забезпечити навантаженням  $E_{batt,disch}$ . Розрахункове виробництво енергії  $E_{PV\_1}$  на день вперед є тією ж величиною, що використовувалася на попередньому кроці, тоді як споживання  $E_{load,TDT}$  відповідає розрахунковим навантаженням під час TDT (рисунок 4). Ці кількості енергії порівнюються та визначається, чи є дефіцит енергії  $E_{PV\_1day-ahead} + E_{batt,disch} \geq E_{load,TDT}$  або надлишок  $E_{PV\_1day-ahead} + E_{batt,disch} < E_{load,TDT}$ .

Якщо виробництво PV та зберігання можуть задовольнити навантаження  $E_{PV\_1day-ahead} + E_{batt,disch} \geq E_{load,TDT}$  у вибраному загальному часі розряду (TDT), розширене керування батареями не потрібне (стратегія BMS №1).

Якщо навантаження занадто високі  $E_{PV\_1day-ahead} + E_{batt,disch} < E_{load,TDT}$ , приймається стратегія зменшення піку (стратегія BMS №2) або відповідні профілі розряду (стратегія BMS №3).

Щоб вибрати найбільш підходящий метод між стратегією BMS №2 і стратегією BMS №3, параметр попереднього самозабезпечення  $R_{suff}$ , тобто співвідношення між попереднім виробництвом фотоелектричної енергії плюс доступною енергією від батареї та тимчасовими локальними навантаженнями, є розраховано:

Коли коефіцієнт  $R_{suff}$  нижчий за визначене користувачем порогове значення  $R_{thres}$ , приймається стратегія BMS №2: місцеві генератори та накопичувачі забезпечуватимуть низьку кількість енергії для навантажень, які в основному постачатимуться з мережі. Це може призвести до високих піків поглинання. У цьому випадку низька кількість енергії, що зберігається в батареях, використовуватиметься лише тоді, коли навантаження перевищать максимальний ліміт  $P_{load,max}$ , такий як договірний ліміт поглинання потужності або інший поріг, визначений користувачем.

Стратегія BMS №3 приймається, коли відношення  $R_{suff}$  вище визначеного користувачем порогового значення  $R_{thres}$  і нижче одиничного значення. Цей випадок кращий, ніж попередній, тому що більша частина навантажень буде забезпечуватися фотоелектричними системами та накопичувачами, а котирування з мережі є низькими.

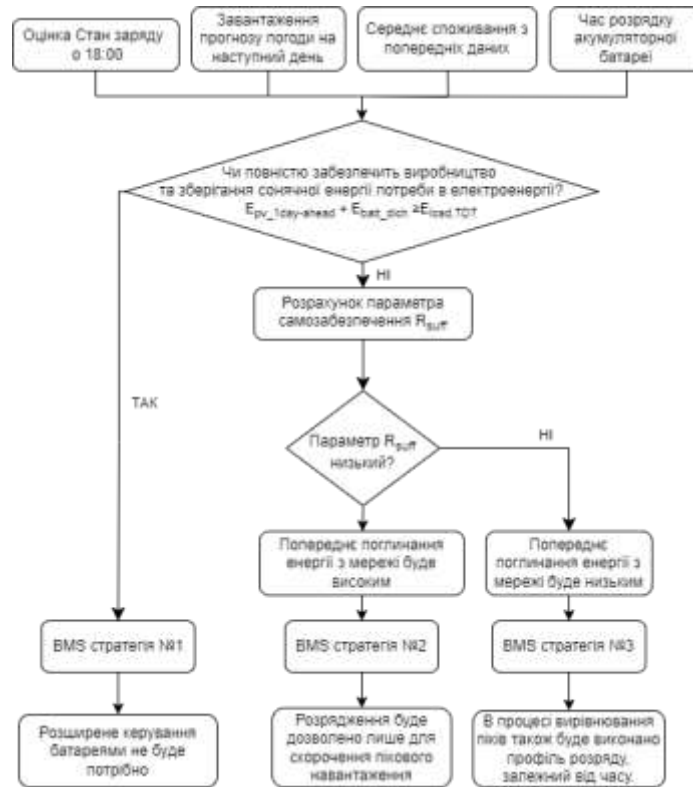


Рисунок 4 – Визначення стратегії управління сховищем.

Багато моделей і концепцій енергетичних систем перебувають у стадії постійного розвитку і змінюються в міру виникнення нових питань і викликів енергетичної політики. Тому оглядові статті можуть дати лише загальне уявлення про ландшафт моделювання на момент проведення дослідження. Для надання постійної та актуальної інформації про різні інструменти моделювання Open Energy Platform надає інформаційні бюлетені про 132 моделі та фреймворки, що використовуються для моделювання енергетичних систем [18].

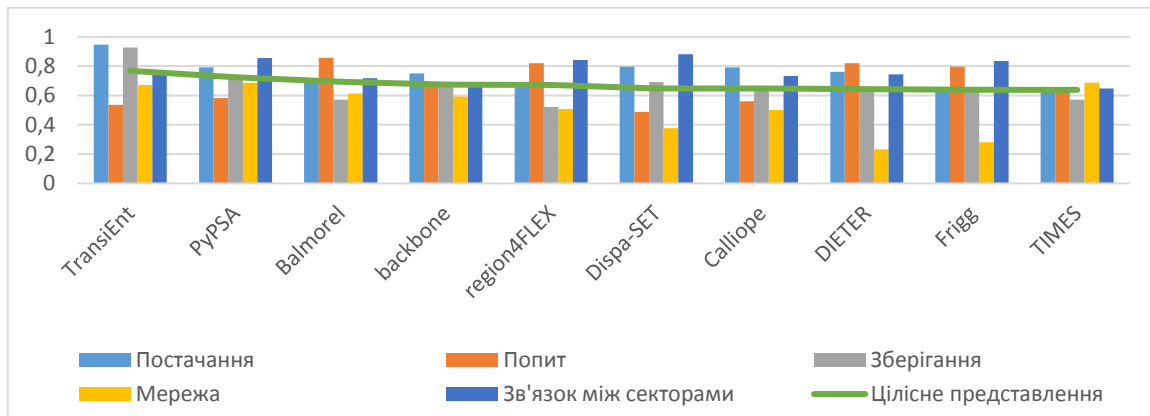


Рисунок 5 – Порівняння інструментів моделювання в енергетиці

Результати показують, що існує широкий спектр моделей, які є сильними в певних сферах і слабшими в інших, залежно від фокусу моделі. При виборі моделі для відповіді на конкретне дослідницьке питання слід враховувати сильні та слабкі сторони кожної моделі.

П'ять моделей з найвищим ступенем представленості (TransiEnt, Dispa-SET, Calliope, PyPSA, DIETER) є кращими в традиційних технологіях генерації та технологічних специфікаціях порівняно з усіма іншими моделями. Зокрема, що стосується технологічних специфікацій, всі п'ять моделей представляють нарощування потужності, мінімальне навантаження та обмежену експлуатацію ВДЕ. Однак не лише традиційні джерела енергії мають попередньо визначені класи в цих моделях; широко

використовувані ВДЕ, такі як біоенергетика, гідроенергетика, фотоелектрична та вітрова енергетика, також демонструють високий рівень представленості.

Чотири моделі, які набрали найбільшу кількість балів в області попиту за результатами оцінки (Balmorel, region4FLEX, DIETER, Frigg), здатні представляти залежні від часу і типу відкладені навантаження. Це є важливою вимогою для представлення гнучких навантажень у системі відновлюваної енергетики. Крім того, розглянуті моделі мають попередньо визначені класи або методи для побутових навантажень. Сектори послуг та промисловості також попередньо визначені в в наведених моделях. Крім того, всі п'ять моделей можуть відображати ефективність технологій попиту. Однак інші експлуатаційні характеристики, такі як нарощування, час реагування та час відновлення, реалізовані лише в трьох з п'яти моделей.

Серед моделей з найвищим рейтингом (TransiEnt, PyPSA, Dispa-SET, backbone) у категорії зберігання даних лише TransiEnt має попередньо визначені класи або методи для всіх розглянутих технологій зберігання. Технології довгострокового та середньострокового зберігання можуть бути реалізовані в інших моделях. Серед моделей найгірше представлені технології короткострокового зберігання. TransiEnt має найбільший вибір допоміжних послуг (резерв обертання, балансування енергії, скидання навантажень, управління введеними ресурсами, корекція коефіцієнта потужності та обмеження).

Моделей, що отримали найвищі бали у сфері об'єднання секторів, Dispa-SET, PyPSA та region4FLEX мають найвищий рівень деталізації моделювання у представленні технологій об'єднання секторів. Технологічні характеристики включають способи реалізації технологій. Ці характеристики, що відповідають згаданим вище характеристикам пропозиції, попиту і зберігання, включають дискретне розширення, згортання для технологій постачання, старіння для технологій зберігання та інші характеристики. Ці характеристики не досягають того рівня репрезентативності, якого досягають самі технології. Більше того, жодна модель не відповідає найвищому ступеню репрезентативності в цій сфері.

Щоб відповісти на конкретні дослідницькі питання за допомогою цілісного гнучкого підходу, різні моделі можна комбінувати, щоб забезпечити широке охоплення категорій. Таким чином, можна використовувати переважно одну модель з широким спектром, що охоплює майже всі категорії. Крім того, можна використовувати одну або дві моделі, які є сильними в конкретних категоріях, що недостатньо охоплені іншою моделлю.

Модель DIETER [19] на Python є потужним інструментом для аналізу енергетичних систем, особливо у контексті розвитку високої частки відновлюваних джерел енергії. DIETER - це відкрита система з вихідним кодом, спеціально розроблена для прогнозування майбутніх умов енергетичного сектору. Її головна мета полягає в мінімізації загальних системних витрат, які включають в себе як постійні, так і змінні витрати, що виникають у різних сценаріях генерації, виключення та з'єднання енергетичних секторів. Використання моделі DIETER на Python дозволяє детально аналізувати різні варіанти розвитку енергетичних систем, що робить її незамінним інструментом для прийняття стратегічних рішень у сфері енергетики.

Функціональні можливості, додані та вдосконалені в DIETERpy, надають нові інструменти для простішого та повнішого прогону сценаріїв, сприяють більш зручному конфігуруванню моделі та підвищують доступність для користувачів. У DIETERpy оригінальна алгебраїчна модель GAMS вбудована у фреймворк Python, або обгортку, яка відповідає за конгруентність моделі, визначення сценаріїв, що досліджуються, та попередню і подальшу обробку даних.

DIETERpy можливо легко встановити за допомогою менеджерів пакетів Python, і для перших запусків не потрібно глибоких знань GAMS. Модель можна конфігурувати або за допомогою графічного інтерфейсу користувача на основі браузеру, або за допомогою CSV-файлів. Для виконання стандартних сценаріїв користувачеві не потрібно змінювати код основної моделі на основі GAMS, але тільки для більш фундаментальних змін моделі. DIETERpy має процедуру постобробки даних, яка збирає результати декількох запусків моделі і робить їх доступними для подальшого аналізу в різних вихідних форматах, що дозволяє користувачам продовжувати роботу з обраними ними інструментами. Базові результати моделі також можна візуалізувати в інтерфейсі браузера.

### **Висновки**

За результатами дослідження розглянуто наявне алгоритмічно-програмне забезпечення для моделювання процесів у енергетичних системах з використанням відновлювальних джерел енергії та активного споживача. На основі аналізу питання стратегії управління системами накопичення енергії (ESS), визначено ключові елементи та структуру систем накопичення енергії. Основною проблемою в тому, що електроенергія, вироблена за допомогою ВДЕ змінюється в часі і залежить від багатьох факторів. Проведено порівняльний аналіз стратегій ESS.

Найперспективнішою структурою розподільчої електромережі, яка дозволить краще використовувати розподілені енергетичні ресурси, включаючи ДГ (особливо на основі

відновлюваних джерел) і розподілене накопичення енергії, є електрична MicroGrid (МГ). Наведено переваги створення Microgrid та визначено основні переваги їх впровадження. Описано основні ролі накопичення енергії для задоволення потреб споживачів.

У данній статті проведено аналіз програмного забезпечення, яке використовується у моделюванні енергетичних систем та процесах пов'язаних з активним споживачем. Запропоновані найкращі моделі та комплекси програмних рішень для у різних сферах застосування. Таким чином, відкритий ландшафт моделювання енергетики надає широкий набір рішень для моделювання варіантів гнучкості в енергосистемах. Відповідний вибір залежить від поставленого дослідницького завдання.

#### **Список використаної літератури**

1. Денисюк С.П., Дерев'яно Д.Г., Белоха Г.С. Підвищення якості електропостачання у Energy Smart Community з джерелами розосередженої генерації // Вісник ВПІ. – 2021. – Вип. 5. – С. 64–70.
2. Денисюк С.П., Стржелецьки Р. Формування складових інтелектуальної платформи керування енергетичними системами та мережами // Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2019. – № 3. – С. 7–22.
3. Денисюк С.П., Бойко І.Ю. Підвищення енергоефективності microgrid з дизель-генераторами // Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2021. – № 2. – С. 15–28.
4. Денисюк С.П., Коломійчук М.О. Оцінка фінансових та технічних показників ефективності роботи Microgrid в динамічних режимах // Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2021. – № 3(65). – С.18–39.
5. P. T. Moseley and J. Garche, *Electrochemical Energy Storage for Renewable Sources and Grid Balancing*, 1st ed. London, U.K.: Elsevier, 2014.
6. Conti S, Faraci G, Nicolosi R, Rizzo SA, Schembra G. Battery management in a green fog-computing node: a reinforcement-learning approach. *IEEE Access*. 2017;5:21126–38.
7. H.H. Eldeeb, S. Faddel, O.A. Mohammed, Multi-objective optimization technique for the operation of grid tied PV powered EV charging station, *Electr. Power Syst. Res.* 164 (2018) 201–211.
8. J. Hu, Y. Shan, Y. Xu, J.M. Guerrero, A coordinated control of hybrid ac/dc microgrids with PV-wind-battery under variable generation and load conditions, *Int. J. Electr. Power Energy Syst.* 104 (2019) 583–592.
9. Денисюк С.П., Стржелецьки Р., Богойко І.І., Стржелецька Н. Аналіз особливостей ефективного впровадження сонячних електростанцій в локальних системах енергозабезпечення // Енергетика: економіка, технології, екологія. 2023. № 2. С. 7–25.
10. Денисюк С.П., Лисий В.В. Аналіз процесів енергообміну при балансуванні режимів систем енергозабезпечення з розосередженою генерацією // Енергетика: економіка, технології, екологія. 2023. № 3. С. 7–22
11. Денисюк С.П. Енергетичний перехід – вимоги до якісних змін у розвитку енергетики // Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2019. – № 1. – С.7–28.
12. Денисюк С. П., Соколовський П. В. Аналіз функціонування гнучкої генерації на етапі переходу до інтелектуальних мереж Smart Grid // Електрифікація транспорту. – 2018. – № 15. – С. 31–42
13. Heinisch V, Odenberger M, Göransson L and Johnsson F (2019) Prosumers in the Electricity System— Household vs. System Optimization of the Operation of Residential Photovoltaic Battery Systems. *Front. Energy Res.* 6:145. doi: 10.3389/fenrg.2018.00145
14. Денисюк С.П., Мельничук Г.В., Чернущук І.С., Лисий В.В. Техніко-економічні механізми розвитку локальних систем енергозабезпечення (microgrid) // Енергетика: економіка, технології, екологія. 2021. № 4. С. 7–22.
15. Wu, X.; Tang, Z.; Stroe, D.-I.; Kerekes, T. Overview and Comparative Study of Energy Management Strategies for Residential PV Systems with Battery Storage. *Batteries* 2022, 8, 279. <https://doi.org/10.3390/batteries8120279>
16. F. Spertino, A. Ciocia, P. Di Leo, G. Malgaroli, and A. Russo, 'A Smart Battery Management System for Photovoltaic Plants in Households Based on Raw Production Forecast', *Green Energy Advances*. IntechOpen, Feb. 20, 2019. doi: 10.5772/intechopen.80562.
17. BESS BASICS: BATTERY ENERGY STORAGE SYSTEMS FOR PV-SOLAR [Електронний ресурс]. – 2021. – Режим доступу до ресурсу: <https://blog.norcalcontrols.net/bess-battery-energy-storage-systems-pv-solar>
18. OpenEnergy family, OpenEnergy Platform (OEP). URL <https://openenergyplatform.org>
19. C. Gaete-Morales, M. Kittel, A. Roth, W.-P. Schill, DIETERpy: A Pythonframework for the Dispatch and Investment Evaluation Tool with EndogenousRenewables, *SoftwareX* 15 (2021) 100784. doi:10.1016/j.softx.2021.100784.

**I. Bohoiko<sup>1</sup>**, Ph. D. student, ORCID 0000-0002-6816-6352

<sup>1</sup>National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

## **COMPARATIVE ANALYSIS OF ALGORITHMIC AND SOFTWARE SOFTWARE FOR MODELING PROCESSES IN SYSTEMS WITH ACTIVE CONSUMERS WITH PHOTOVOLTAIC GENERATION**

*The article considers the use of algorithmic and software in the context of smart grid development. It has been determined that energy storage systems are key elements of energy management systems for smart communities, as they allow storing energy generated by renewable energy sources (RES) and compensating for*

the uneven demand for electricity. A comparative analysis of different EMS strategies that combine solar panels and batteries is carried out.

The main energy management strategies are analyzed and the advantages and disadvantages that should be taken into account when choosing them are identified. The concept of smart inverters and their integration into energy storage systems is considered. The structure of hybrid energy storage systems and the main roles of energy storage are presented. The economic benefits of implementing Microgrid and Smart Grid in the energy sector are shown. The development of integrated strategies for managing energy storage systems that take into account all aspects of electricity generation, storage and distribution in smart grids, promoting sustainable and efficient use of resources, is proposed.

The main models and frameworks used for modeling energy systems are considered and the advantages and disadvantages of the models that should be taken into account when researching clear issues in the context of energy management systems development are identified.

**Keywords:** energy management, renewable energy sources, distributed generation, energy storage systems

### References

1. Denysiuk S.P., Derevianko D.G., Belokha G.S. Improving the quality of power supply in Energy Smart Community with sources of distributed generation // VPI Bulletin. - 2021. - Issue 5. - P. 64-70.
2. Denysiuk S.P., Strzelecki R. Formation of components of an intelligent platform for managing energy systems and networks // Energy: Economics, Technology, Ecology. - 2019. - No. 3. - P. 7-22.
3. Denysiuk S.P., Boyko I.Y. Improving the energy efficiency of microgrid with diesel generators // Energy: Economics, Technology, Ecology. 2021. - No. 2. - P. 15-28.
4. Denysiuk S.P., Kolomiichuk M.O. Evaluation of financial and technical indicators of Microgrid performance in dynamic modes // Energy: Economics, Technology, Ecology. 2021. - No. 3 (65). - P. 18-39.
5. P. T. Moseley and J. Garche, Electrochemical Energy Storage for Renewable Sources and Grid Balancing, 1st ed. London, U.K.: Elsevier, 2014.
6. Conti S, Faraci G, Nicolosi R, Rizzo SA, Schembra G. Battery management in a green fog-computing node: a reinforcement-learning approach. IEEE Access. 2017;5:21126-38.
7. H.H. Eldeeb, S. Faddel, O.A. Mohammed, Multi-objective optimization technique for the operation of grid tied PV powered EV charging station, Electr. Power Syst. Res. 164 (2018) 201-211.
8. J. Hu, Y. Shan, Y. Xu, J.M. Guerrero, A coordinated control of hybrid ac/dc microgrids with PV-wind-battery under variable generation and load conditions, Int. J. Electr. Power Energy Syst. 104 (2019) 583-592.
9. Denysiuk S.P., Strzelecki R., Boiko I.I., Strzelecki N. Analysis of the features of effective implementation of solar power plants in local energy supply systems // Energy: Economics, Technology, Ecology. 2023. № 2. С. 7-25.
10. Denysiuk S.P., Lysyi V.V. Analysis of energy exchange processes in balancing the modes of energy supply systems with dispersed generation // Energy: Economics, Technology, Ecology. 2023. № 3. С. 7-22
11. Denysiuk S.P. Energy transition - requirements for qualitative changes in the development of energy // Energy: Economics, Technology, Ecology. 2019. - No. 1. - P. 7-28.
12. Denysiuk S.P., Sokolovskyi P.V. Analysis of the functioning of flexible generation at the stage of transition to smart grids Smart Grid // Transport Electrification. - 2018. - No. 15. - P. 31-42.
13. Heinisch V, Odenberger M, Göransson L and Johnsson F (2019) Prosumers in the Electricity System-Household vs. System Optimization of the Operation of Residential Photovoltaic Battery Systems. Front. Energy Res. 6:145. doi: 10.3389/fenrg.2018.00145
14. Denysiuk S.P., Melnychuk G.V., Cherneshchuk I.S., Lysyi V.V. Technical and economic mechanisms for the development of local energy supply systems (microgrid) // Energy: Economics, Technology, Ecology. 2021. № 4. С. 7-22.
15. Ву, Х., Танг, З., Строе, Д.-І., Керекес, Т. Огляд та порівняльне дослідження стратегій енергоменеджменту для побутових фотоелектричних систем з акумуляторними батареями. Batteries 2022, 8, 279. <https://doi.org/10.3390/batteries8120279>
16. F. Spertino, A. Ciocia, P. Di Leo, G. Malgaroli, and A. Russo, "Розумна система управління батареями для фотоелектричних установок в домогосподарствах на основі прогнозу виробництва сировини", Green Energy Advances. IntechOpen, 20 лютого 2019 року. doi: 10.5772/intechopen.80562.
17. BESS BASICS: Акумуляторні системи зберігання енергії для фотоелектричних станцій [Електронний ресурс]. - 2021. - Режим доступу до ресурсу: <https://blog.norcalcontrols.net/bess-battery-energy-storage-systems-pv-solar>
18. OpenEnergy family, OpenEnergy Platform (OEP). URL <https://openenergyplatform.org>
19. C. Gaete-Morales, M. Kittel, A. Roth, W.-P. Schill, DIETERpy: Pythonframework для інструменту диспетчеризації та оцінки інвестицій в ендогенні відновлювані джерела енергії, SoftwareX 15 (2021) 100784. doi:10.1016/j.softx.2021.100784.

Надійшла: 03.04.2024

Received: 03.04.2024

## АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ ВПЛИВУ ТЕМПЕРАТУРИ НА ДЕГРАДАЦІЮ ТА ЕФЕКТИВНІСТЬ РОБОТИ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ

*В статті обґрунтовано актуальність питання щодо дослідження та аналізу впливу деградації на ефективність роботи сонячних панелей. Проведено короткий аналіз основних особливостей використання сонячних панелей різних типів. Детально розглянуто основні види та причини деградації фотоелектричних модулів. Отримано основні висновки щодо найбільш впливових чинників деградації, серед яких доцільно виділити для подальшого дослідження вплив температури – як зовнішньої температури повітря, так і температури нагрівання безпосередньо сонячної панелі. Проведений аналіз сучасних досліджень з питань вивчення особливостей деградації фотоелектричних модулів. Особливу увагу акцентовано на дослідженнях впливу температури на ефективність їх роботи. На базі лабораторної установки проведені попередні експериментальні вимірювання параметрів роботи сонячної панелі при різних інтенсивностях світла та при нагріванні панелі в межах від 19 до 78 °С. На основі отриманих даних побудовано графік залежності ефективності сонячного фотомодуля від температури його поверхні та встановлено, що ефективність роботи панелі починає активно знижуватись після зростання температури її поверхні понад 50-55°С.*

**Ключові слова:** аналіз, сонячна панель, ефективність роботи, деградація, температура, дослідження

### Вступ

Одним із найбільш важливих напрямків сучасності, з яким пов'язані цілі сталого розвитку ООН, є розвиток відновлюваних джерел енергії. Найбільшого поширення серед відновлюваної енергетики на сьогодні набула саме сонячна. На теренах нашої держави сонячні електростанції почали експлуатуватись близько 20-ти років назад, а найбільш масового поширення набули за останні 5-7 років. В той же час, основна складова сонячних станцій – фотоелектричні модулі – за заявами виробників можуть експлуатуватись із максимальною та достатньою ефективністю впродовж 20-30 років, протягом яких панелі поступово деградують, що призводить до зниження ефективності вироблення ними енергії. Станом на сьогодні у світі відсутня значна кількість сонячних панелей, які вже експлуатуються нормативний термін, а в Україні такі фотоелектричні модулі практично відсутні. У зв'язку з цим, чітко підтвердити зниження їх ефективності після встановленого терміну експлуатації на даний час дуже складно. Також виникає питання необхідності подальшої утилізації сонячних панелей, які не придатні для подальшої експлуатації, що може бути складним екологічним питанням майбутнього. Тому, важливим та актуальним завданням є необхідність оцінювання рівня деградації сонячних панелей, які перебувають в експлуатації, а також визначення впливу температури, як основної причини деградації, на ефективність їх роботи.

**Метою** даної статті є аналіз основних причин деградації фотоелектричних модулів, а також оцінювання впливу температури на ефективність роботи сонячної панелі.

Для досягнення поставленої мети слід вирішити наступні **завдання**:

- провести аналіз особливостей використання сонячних панелей різних типів;
- проаналізувати основні причини, які викликають розвиток деградаційних процесів у фотоелектричних модулях;
- провести аналіз існуючих досліджень з питання деградації та впливу температури на роботу сонячних панелей;
- провести попередні вимірювання щодо зміни ефективності роботи сонячної панелі при зміні температури на прикладі лабораторної установки.

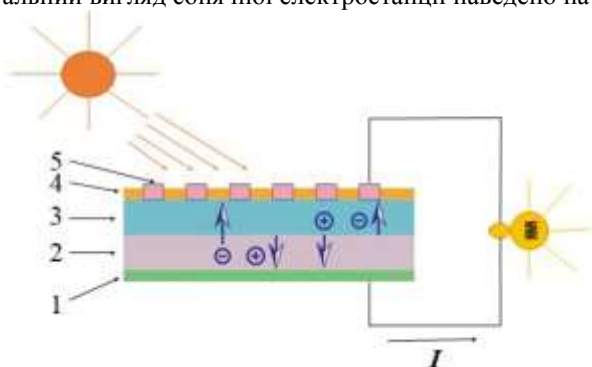
### Матеріал і результати досліджень

#### Аналіз особливостей використання сонячних панелей

Сонячна батарея – це об'єднання фотоелектричних модулів (PV – photovoltaic modules), які використовуються для поглинання більшої кількості світлової енергії, що, відповідно, дозволяє виробляти більшу кількість електричної енергії [1]. Фотоелектричний модуль – це з'єднання фотоелементів. Фотоелемент – це напівпровідниковий пристрій, що перетворює сонячну енергію в електричну. Робота сонячної панелі полягає в об'єднанні енергії, яка виробляється багатьма комірками. Це дає змогу створити корисну кількість електричного струму та напруги за допомогою фотоелектричного ефекту.

Фотоэффект – це явище взаємодії електромагнітного випромінювання з речовиною, в результаті якого енергія фотонів передається електронам речовини й останні переходять у новий енергетичний стан [2]. Тобто фотоэффект – це повне або часткове вивільнення електронів від зв'язків з ядрами атомів речовини внаслідок дії на неї електромагнітного проміння (світла, рентгенівського чи гамма-променів).

Для роботи сонячних станцій сонячні батареї з'єднуються між собою послідовно і паралельно. Це пов'язано з тим, що послідовне з'єднання забезпечує більшу напругу, а паралельне – більшу силу струму. Якщо на одній сонячній панелі виникне тінь, то цілий ряд панелей не буде працювати, тому суттєво зменшиться вихідна потужність роботи сонячних панелей в загальному. Схема будови сонячної панелі наведена на рисунку 1. Загальний вигляд сонячної електростанції наведено на рисунку 2.



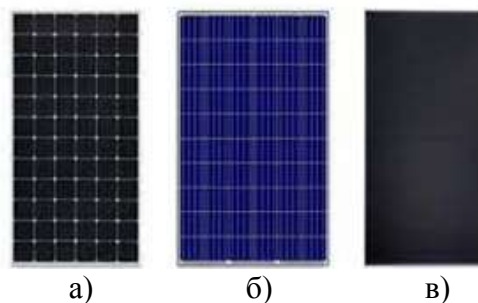
1 – внутрішній електрод, 2 – напівпровідник p-типу, 3 – напівпровідник n-типу, 4 – антиблік-покриття, 5 – зовнішній електрод, I – струм

Рисунок 1 – Будова сонячної батареї

В загальному сонячні панелі бувають кристалічні (які поділяються на моно- та полікристалічні) і тонкоплівкові (рисунок 3) [3]. Кристалічні сонячні панелі виготовляються з кремнію, який спочатку розплавляється. Потім сплав кремнію кристалізується у злитки з чистого кремнію. Тонкі пластини кремнію вирізаються з монокристалу кремнію (монокристалічний) або зі злитків кристалів кремнію (полікристалічний). Ефективність для цих типів фотоелементів становить від 15 до 25%.



Рисунок 2 – Загальний вигляд сонячної електростанції



а) монокристалічні, б) полікристалічні, в) тонкоплівкові

Монокристалічний кремній – це тип кремнію, виготовлений із монокристалічної структури. Монокремній має однорідну форму, оскільки вся структура вирощена з одного кристала. Тому вони мають більшу щільність поглинання сонячної енергії. Це призводить до високої ефективності перетворення енергії монокристалічних сонячних панелей – від 20 до 25%. Монокристалічні панелі мають високу вихідну потужність, займають менше місця і служать найдовше. Ще одна перевага, яка полягає в тому, що вони дещо менше зазнають впливу високих температур у порівнянні з полікристалічними панелями.

Полікристалічний кремній – це тип кремнію, виготовлений зі злитків кристалів кремнію. Через злитки кристалів кремнію виникають межі між ними. Це в свою чергу спричиняє обмеження проходження електронів у фотоелементах. Це призводить до зменшення ефективності перетворення енергії полікристалічних панелей, яка складає від 15 до 20%.

Тонкоплівковий фотоелектричний елемент – тип фотоелемента, який виготовляють шляхом друку або розпилення тонкого напівпровідникового шару матеріалу на скляну, металеву або пластикову фольгу. Товщина кожного фотоелемента значно менша за розрізаний кристалічний елемент. Ефективність перетворення енергії цих сонячних панелей складає від 7 до 12%. Тонкоплівкові сонячні панелі можуть



виготовлятися з таких матеріалів: телурид кадмію (CdTe), аморфний кремній, диселенід міді-індію (CIS), селенід міді-індію-галію (CIGS) [4].

Монокристалічні і тонкоплівкові сонячні панелі використовуються для домашніх електростанцій. Монокристалічні трекерні і полікристалічні сонячні панелі використовуються в основному для промислових підприємств.

#### **Аналіз причин деградації сонячних панелей**

Деградація сонячних панелей – це зменшення вихідної потужності сонячних панелей з часом, яке спричинене виникненням різних фізичних процесів та яке призводить до зниження їх ефективності та, можливо, до виходу з ладу.

Залежно від причин пошкодження, деградацію доцільно поділити на такі види [5-12]:

1. Механічна деградація [6-8,11];
2. Деградація, викликана впливом навколишнього середовища [5-7];
3. Електрична деградація [5,8-10];
4. Деградація, пов'язана з будовою сонячних панелей [8,11,12].

Механічна деградація – деградація, викликана механічними пошкодженнями. Наслідком механічної деградації можуть бути:

1. Мікротріщини [11];
2. Розшарування [8].

Деякі типи мікротріщин можуть вирости залежно від їх форми та розташування в фотоелектричному модулі. Це зростання може статися через транспортування, неправильне встановлення, пошкодження, вібрацію, надмірне навантаження, неправильне очищення, а також під час експлуатації та етапу обслуговування. Нові панелі можуть мати мікротріщини, але їхній вплив нехтується; проблема виникає, коли панелі піддаються декільком умовам, таким як погодні умови, очищення тощо [11]. Приклад мікротріщин зображено на рисунку 4, (б).

Розшарування відбувається через втрату міжфазних зв'язків, що призводить до появи проміжків між склом–EVA, EVA–коміркою, коміркою–EVA та EVA–задньою стороною фотоелектричного модуля. За даними SolarWorld (німецька компанія), проблема розшарування спостерігалася у понад 90% відновлених модулів. Це явище в основному характерне і реєструється в екстремальних погодних умовах (дуже жарко і волого). Зменшення продуктивності модуля через індукцію проникнення вологи, що призводить до погіршення вихідної потужності, і збільшення послідовного опору є наслідками розшарування [8]. Розшарування зображено на рисунку 4, (а).

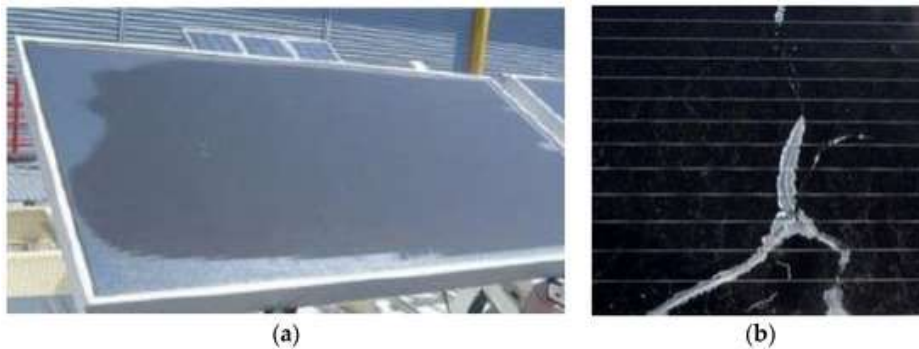


Рисунок 4 – Пошкоджені сонячні панелі: (а) розшарування; (б) тріщини [8,11]

Сонячні модулі схильні до впливу зовнішніх факторів, що неминуче - це природний знос сонячних панелей. Такі процеси старіння відбуваються через хімічні реакції в напівпровідниках, що викликають кристалічні затвердіння, а також із-за забруднення фотомодулів, кліматичних умов, впливу ультрафіолету. Зазвичай, даний тип деградації незворотній, і з економічної точки зору сенсу в його усуненні немає [5].

Втрати від забруднення відносяться до втрат потужності, що виникають в результаті дії снігу, бруду, пилу та інших речовин, які покривають поверхню сонячного модуля. Інтенсивність забруднення поверхні модулю залежить від місця його розташування та навколишнього середовища. Фактично кількість накопиченого пилу на поверхні модуля впливає на загальну енергію, що генерується модулем. За даними проведеного дослідження у 2014 році встановлено, що Близький Схід та Північна Африка є територіями з найбільшим накопиченням пилу у світі [6].

Електрична деградація – деградація, яка залежить від електричних процесів, проходження струму, які викликають зменшення вихідної потужності сонячних панелей. До електричної деградації може належати потенційна індукована деградація (PID), яка спричиняє виникнення струмів витоку із сонячних панелей, через що зменшується вихідна потужність сонячних панелей. Ще до електричної деградації належить електроміграція (EM).

Електроміграція (ЕМ) має величезний вплив на металізацію та з'єднання фотоелектричних модулів. Високий струм, що проходить через фотоелектричний модуль, може спричинити перепад напруги та потенційно призвести до ЕМ. Збої внаслідок цього явища, які впливають на зростання ямок травлення на межі розділу метал/напівпровідник, можуть бути різними, а утворення горбів і виступів, які викликають замикання (шунтування), і утворення пустот у провіднику зрештою призводять до відкритого розриву. І передне, і заднє з'єднання перетинають стінку комірки в межах невеликої зони дефекту шунта, знижуючи якість сонячної батареї [8]. На рисунку 5 зображено результати випробування надійності металізації Cu/Ni/Si сонячних елементів при температурі 235 °С, через що мідь починає мігрувати (дифундувати) в Ni/Si, в результаті чого на сонячних панелях утворюються масивні порожнечі.

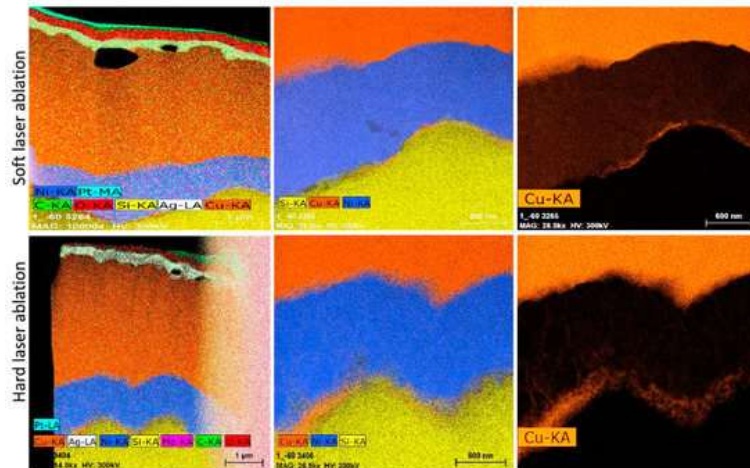


Рисунок 5 – Cu/Ni/Si стек TEM-зображення, отримані після прискореного старіння при 235 °С [8]

Деградація, пов'язана з будовою сонячних панелей залежить від [13]:

- 1) технології виробництва;
- 2) застосовуваних при виготовленні матеріалів;
- 3) методу пайки сонячних елементів;
- 4) якості EVA плівки, розташованої між скляною плитою і елементами;
- 5) хорошої герметизації і якості нижньої захисної плівки.

В загальному, деградація сонячних панелей поділяється на три основні види:

1. Світлова індукована деградація (LID – Light induced degradation) [5,12];
2. Потенційна індукована деградація (PID – Potential induced degradation) [5,8-10];
3. Температурна індукована деградація (TID – Temperature induced degradation) [12].

Світлова індукована деградація (LID) – деградація сонячних панелей, яка виникає, коли сонячна панель вперше піддається впливу сонячної радіації, в результаті її фотопровідність зменшується. Це вважається етапом «налаштування» панелі.

Потенційна індукована деградація (PID) – деградація сонячних панелей, яка виникає, коли різні компоненти в системі знаходяться під різними напругами. Наприклад, при різниці потенціалів між сонячними елементами і рамкою (монтажною конструкцією, алюмінієвим або сталевим каркасом). Таке відхилення викликає витік напруги і, отже, знижує вихідну потужність панелі. PID не завжди відбувається, але якщо це трапиться, продуктивність панелі може знизитися аж до 30%. Схильні до неї всі типи панелей. У деяких випадках потенційна деградація може бути оборотною, але цей процес завжди є досить непростою технічною проблемою, яка потребує швидкого вирішення [5].

Температурна індукована деградація (TID) – деградація сонячних панелей, яка викликана підвищенням температури навколишнього середовища, і відповідно, підвищенням температури сонячних панелей, в результаті чого зменшується вихідна потужність сонячних панелей. Підвищення температури навколишнього середовища призводить до ще більшого підвищення температури сонячних панелей, оскільки сонячні панелі складаються переважно з кремнію, а кремній – метал. Влітку в спекотну погоду температура поверхні сонячних панелей може підвищуватися до 50–60 °С. Така висока температура поверхні сонячних панелей призводить до зниження ефективності сонячних панелей. Тому, підвищення температури поверхні сонячних панелей також впливає на прискорення їх деградації.

Швидкість деградації сонячних панелей також залежить від будови модулів, для прикладу, монокристалічні модулі зазвичай працюють 30 років і більше, полікристалічні можуть служити 20 і більше років, тоді як аморфні тільки від 7 до 20 років (все залежить від року виробництва і застосування нових тонкоплівкових технологій) [13].

В середньому фотоелектричні елементи втрачають ефективність зі швидкістю 1% щороку. Це підтверджують виробники – зазвичай, вони гарантують 90% продуктивності до перших десяти років і 80% до 25 або 30 років роботи. Однак нові дослідження підтверджують, що монокристалічні панелі, виготовлені після 2000 року, можуть деградувати зі швидкістю всього 0,4%. Тонкоплівкові батареї втрачають в середньому 10-40% ефективності в перші кілька років.

Виробники визначають «корисний» термін служби сонячних панелей – коли їх обсяг виробництва падає нижче 80%. Але це не означає, що вони не приносять користі. СЕС буде продовжувати виробляти енергію з більш низьким рівнем ефективності [13].

Тому важливо зрозуміти чи є можливість сповільнення деградації та доцільність продовження використання сонячних панелей після встановленого виробниками терміну експлуатації.

#### **Аналіз досліджень впливу температури на ефективність роботи сонячних фотомодулів**

Важливим завданням сьогодні є оцінювання впливу різноманітних чинників на ефективність (коефіцієнт корисної дії) роботи сонячних панелей, який описує частку енергії сонячного світла, яке падає на поверхню сонячних панелей, і яка перетворюється на електричну енергію. На зниження ефективності фотоелектричних модулів і на їхній термін експлуатації впливає деградація сонячних модулів. Серед усіх видів деградації сонячних панелей, які наведені вище, найпоширенішою є температурна, яка спричинена постійним підвищенням температури поверхні сонячних панелей. Тому важливо досліджувати саме вплив температури на ефективність експлуатації фотоелектричних модулів [14,15].

На даний час все збільшується кількість досліджень в сфері деградації сонячних панелей та безпосередньо впливу зміни температури на ефективність їх роботи. Так, для прикладу, Чорна В. О., Мельник О. Є. та ін. досліджували вплив погодних умов на ефективність роботи фотоелектричної установки [16], питанням деградації сонячних панелей займаються Панченко В. В. та Харін Р. О. [17], вплив метеорологічних умов на ефективність роботи сонячних панелей в Івано-Франківській області досліджували Архипова Л. М. та Смик І. Є. [18], залежність ефективності роботи сонячних панелей від температури навколишнього середовища досліджувала Нечепоренко О. О. [19], Захаров Д. В. і Книш Л. І. математично моделювали вплив температурного режиму на ефективність роботи сонячної панелі [20].

Чорна В. О., Мельник О. Є. та ін. в [16] визначали формули для струму, який виробляють сонячні панелі, формули залежності температури поверхні сонячних модулів від метеорологічних параметрів таких, як температура повітря, вологість повітря, тиск повітря, швидкість вітру та інтенсивності світла. Знайшовши температуру поверхні сонячних панелей, визначали струм короткого замикання, напругу і струм, які забезпечують максимальну потужність (МРР) сонячних панелей. Також отримали вольт-амперну характеристику сонячних панелей кожного місяця протягом року та вольт-ватну характеристику в березні; отримали таблицю відповідності виробленої сонячними панелями електроенергії навантаженню при різній їх кількості впродовж року.

Панченко В. В. та Харін Р. О. визначали в [17] формулу для розрахунку швидкості деградації сонячних панелей протягом встановленого терміну їхньої роботи. Дослідження пов'язані із зниженням ефективності протягом різного терміну роботи сонячних панелей моно- та полікристалічного типу. Автори також визначали вольт-амперну та вольт-ватну характеристику сонячних панелей та зміну втрат невідповідності отриманих залежностей при різних довжинах провідників, щоб встановити залежність виробництва електроенергії від опору провідника. Ті самі характеристики отримали для залежності від температури. Дослідження проводились при температурі 40 і 50 °С, з якої встановили, що більша потужність буде вироблятися при температурі 40 °С, а при 50 °С потужність буде меншою. Також проводилось досліджувати вплив наявності дефектного модуля за різних умов та інтенсивності світла. Отримані різні графіки швидкості деградації залежно від терміну роботи сонячних панелей.

Архипова Л. М. та Смик І. Є. отримали в [18] таблиці середньомісячних значень метеорологічних параметрів таких, як температура повітря, кількість опадів, швидкість вітру та побудували відповідні графічні залежності за період 2015-2022 років. Отримані також дані щодо помісячного виробництва електроенергії сонячною електростанцією за той же період часу. На основі отриманих результатів авторами зроблений висновок, що найбільший вплив на виробництво електроенергії має температура повітря, а інші параметри мають незначний вплив. На основі побудованого графіка залежності виробництва електроенергії від температури можна зробити висновок, що при збільшенні температури повітря до 21 °С виробництво електроенергії також зростає, а при зростанні температури вище 21 °С виробництво електроенергії починає зменшуватися.

Нечепоренко О. О. досліджувала в [19] причини впливу підвищення температури навколишнього середовища на зменшення ефективності сонячних панелей. Автором встановлено лінійну залежність ефективності сонячної панелі від температури за допомогою температурного коефіцієнта, які вказуються виробником в паспорті. Отримано вольт-амперну характеристику виробництва електроенергії сонячними панелями при різній температурі. З отриманих даних зрозуміло, що при збільшенні температури поверхні панелі зменшується напруга і незначно збільшується струм, в результаті чого зменшується вихідна потужність.

Захаров Д. В., Книш Л. І. визначали в [20] рівняння теплового балансу сонячної панелі, рівняння теплопровідності, яке відповідає рівнянню Пуассона, що описує функцію декартових координат  $x$  і  $y$  та описує об'ємну щільність теплового потоку від дії внутрішніх джерел тепла, виражене на одиницю коефіцієнта теплопровідності, які в сумі дорівнюють нулю. Також визначена формула для об'ємної щільності теплового потоку, яка визначається функцією коефіцієнта корисної дії (ККД) від температури, інтенсивністю світла та висотою панелі. Два останні рівняння доповнюються граничними умовами для декартових координат  $x$ ,  $y$ . В цих рівняннях є функції довжини сонячної панелі  $x$  та  $y$ , вказується також температура навколишнього середовища та коефіцієнти тепловіддачі та поглинання тіла. Коефіцієнт тепловіддачі розраховувався відповідно до критеріїв Нуссельта, Рейнольдса, Прандтля та Грасгофа. Радіаційні втрати з поверхні сонячної панелі розраховувалися відповідно до Закону Стефана–Больцмана. В рівнянні Пуассона міститься залежність ККД від температури. Для знаходження цієї залежності були апроксимовані з використанням регресійного аналізу експериментальні дані, в результаті чого отримали рівняння для функції зміни ККД залежно від температури сонячної панелі. Також був розроблений числовий алгоритм для моделювання, в результаті чого отримано графіки залежності температури від довжини панелі при різній висоті та при врахуванні чи без врахування ККД. Отримані реальні результати ККД, яке враховує ККД, заявлене виробником, а також супутні параметри, які розраховуються за допомогою поверхневих інтегралів. Як висновок в роботі авторів отримано реальне значення ККД, яке є меншим, ніж ККД, заявлене виробником, на 0,01. Незначне зниження ККД на одній сонячній панелі може призводити до енергетичних витрат в промислових масштабах.

Таким чином, можна стверджувати, що питання оцінювання впливу температури на ефективність роботи сонячних станцій активно розвивається та потребує більше детального оцінювання. Для цього нами були проведені попередні вимірювання впливу температури нагрівання сонячної панелі на її ефективність роботи. Дані вимірювання проведені на базі наявної лабораторної установки в університеті. Деталі проведених вимірювань наведені нижче.

#### **Оцінювання впливу температури сонячної панелі на ефективність її роботи**

З метою оцінювання впливу температури на ефективність фотоелектричних модулів нами було проведено експериментальні дослідження роботи сонячного фотомодуля при різному його нагріванні від 19 до 78 °С. Також ми збільшували інтенсивність світла, в ролі джерела якого використовувалася галогенна лампа, від 187 до 2000 Вт/м<sup>2</sup>. Змінювати інтенсивність світла в галогенній лампі можна, змінюючи вхідну напругу, яка подається на лампу. Для вимірювання температури поверхні фотомодуля використовувався пірометр, а для вимірювання інтенсивності світла – піранометр. Електричне коло експерименту, яке зображене на рисунку 6, складається з джерела струму, тобто із сонячної панелі, навантаження, до якого належить декадний магазин додаткових опорів, і ампервольтметра.

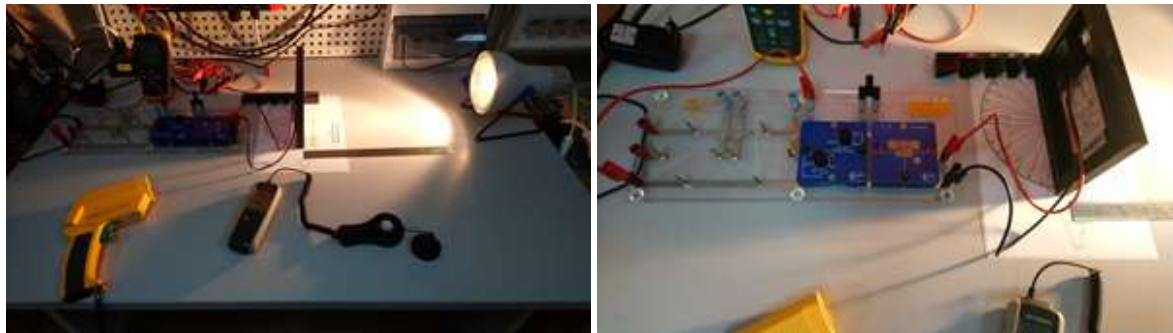


Рисунок 6 – Схема елементів експерименту для дослідження ефективності роботи сонячних фотомодулів під впливом температури

Отримані результати прямих вимірювань таких параметрів, як температура, вихідна напруга, струм та інтенсивність світла при різній температурі нагрівання. Непрямим способом визначалась вихідна потужність, її значення на одиницю площі, а також ефективність сонячної панелі. Вихідна потужність  $P$  визначається добутком виміряних напруги  $U$  і струму  $I$ . Вихідна потужність на площу  $P/S$  – відношення вихідної потужності  $P$  до площі  $S$ . Площа сонячної панелі  $S$  визначається добутком довжини  $l$  на ширину  $w$  панелі, яка вимірюється за допомогою лінійки. Площа сонячної панелі, з якою проводилося дослідження дорівнює:  $S = 0,01378$  м<sup>2</sup>. Це потрібно, щоб, знаходячи ефективність, була визначена однакова площа, як для інтенсивності світла, так і для вихідної потужності. Ефективність сонячної панелі  $e$  визначається відношенням електричної енергії  $E_{ел}$ , яку виробляє панель, до енергії падаючого світла  $E_{св}$ , якщо цю енергію звести, поділивши на час і площу, тоді ефективність  $e$  буде визначатися відношенням вихідної потужності на площу  $P/S$  до інтенсивності світла  $E$ . Ефективність  $e$  знаходиться за формулою (1):

$$e = \frac{E_{ел}}{E_{св}} = \frac{P_{ел}}{P_{св}} = \frac{P/S}{E} = \frac{P}{S \cdot E} = \frac{U \cdot I}{S \cdot E} = \frac{U \cdot I}{l \cdot w \cdot E} \quad (1)$$

де  $P_{ел}$  і  $P_{св}$  – електрична вихідна потужність і потужність падаючого світла відповідно, які знаходяться відношенням електричної енергії  $E_{ел}$  і енергії падаючого світла  $E_{св}$  до часу відповідно.

В таблиці 1 наведено фрагмент отриманих результатів вимірювань і розрахунків при температурі від 19 до 28 °С.

Таблиця 1 – Результати вимірювання і розрахунків параметрів експериментального дослідження при нагріванні фотомодуля від 19 до 28 °С

№ досліджу	Температура поверхні сонячної панелі t, °С	Ефективність сонячної панелі e, %	Вихідна напруга U, В	Вихідний струм I, мА	Вихідна потужність P, Вт	Вихідна потужність на площу P/S, Вт/м <sup>2</sup>	Інтенсивність світла E, Вт/м <sup>2</sup>
1	19	0,617507354	0,899	17,7	0,0159123	1,154738752	187
2	20	0,644839068	0,913	18,2	0,0166166	1,205849057	187
3	21	0,654773639	0,922	18,3	0,0168726	1,224426705	187
4	22	0,715269747	0,955	19,3	0,0184315	1,337554427	187
5	23	0,693110996	0,945	18,9	0,0178605	1,296117562	187
6	24	0,667673059	0,93	18,5	0,017205	1,248548621	187
7	25	0,66478333	0,95	18,9	0,017955	1,302975327	196
8	26	0,693144457	0,97	19,3	0,018721	1,358563135	196
9	27	0,777822932	1,16	23,1	0,026796	1,944557329	250
10	28	0,811785196	1,18	23,7	0,027966	2,02946299	250

На основі отриманих даних побудовано графік залежності ефективності сонячного фотомодуля від температури його поверхні при нагріванні від 19 до 78 °С, який наведений на рисунку 7. Також побудовано криву апроксимації отриманих результатів на базі поліному другого степеню із коефіцієнтом детермінації  $R^2=0,8168$ .

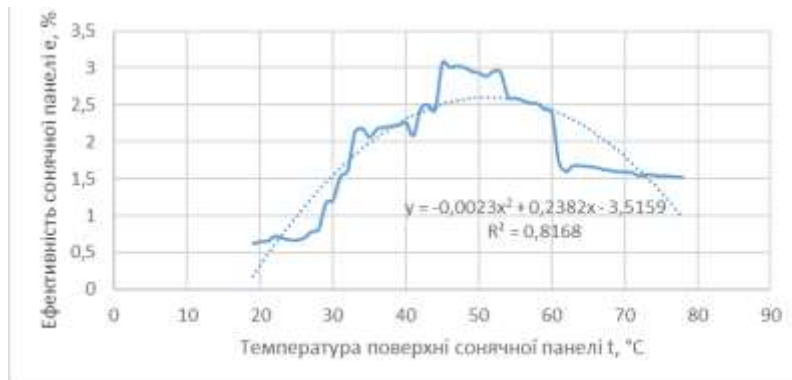


Рисунок 7 – Графік залежності ефективності роботи сонячного фотомодуля від температури  $e(t)$  при нагріванні від 19 до 78 °С

### Висновки

Згідно отриманих результатів можна судити про максимальну ефективність роботи сонячного фотомодуля при температурі його нагрівання 45-53 °С. При зростанні температури понад 50-55 °С ефективність виробітку електричної енергії починає активно знижуватись, що свідчить про зменшення ефективності роботи сонячного фотомодуля загалом.

Для підтвердження та деталізації отриманих даних подальшим завданням є проведення аналогічних досліджень з різними типами сонячних панелей та у різних умовах експлуатації. Також наступним кроком буде додаткове дослідження впливу зовнішньої температури на ефективність експлуатації фотоелектричних модулів, а також пошук конкретного зв'язку впливу даної температури на нагрівання сонячних елементів та, відповідно, оцінювання впливу даних параметрів на процес деградації сонячних панелей загалом.

### Список використаної літератури

1. Шаварський В., Тиш Є. Основні поняття систем перетворювачів сонячної енергії. Тернопіль : Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2022. С. 98.
2. Засєкіна Т. М., Засєкін Д. О. Фізика (профільний рівень, за навчальною програмою авторського колективу під керівництвом Локтєва В. М.) Розділ 3. Оптика. §47 Фотоефект : підручник для 11 класів закладів загальної середньої освіти. Київ : УОВЦ «Оріон», 2019. С. 222–229.

3. Стрельцов О. А., Шкарупа А. О. Аналіз особливостей сонячних батарей. Харків : ХНУ радіоелектроніки, 2022. С. 89–94.
4. Дешевих О. В. Дослідження характеристик і параметрів фотовольтаїчних перетворювачів : магістерська дисертація. Кривий Ріг : Криворізький державний педагогічний університет, 2021. 55 с.
5. Діхтяренко Б. Р., Скурский М. С. Методи оцінки параметрів деградації сонячних панелей. Київ : КПІ ім. Сікорського, 2020. С. 416–418.
6. Шаповал В. С., Шведчикова І. О. Вплив факторів навколишнього середовища на ефективність роботи сонячних панелей. Київ : КНУ технологій та дизайну, 2019. С. 50–51.
7. Study of the influence of dust deposits on photovoltaic solar panels: Case of Nouakchott. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0973082621000569>.
8. Sustainability | Free-Full-Text | Delamination-and Electromigration-Related Failures in Solar Panels–A Review. URL: <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/12/6882>.
9. Трихлеб А. С., Панасюк І. В. Дослідження процесу відновлення деградованих сонячних панелей. Київ : КНУ технологій та дизайну, 2022. С. 27–34.
10. Чертова Д. О., Соколов М. К., Алфьоров М. Є. Деградація сонячних панелей. Харків : ХНУ радіоелектроніки, 2018. С. 152–153.
11. Sustainability | Free-Full-Text | A Comprehensive Evaluation on Types of Microcracks and Possible Effects on Power Degradation in Photovoltaic Solar Panels. URL: <https://www.mdpi.com/2071-1050/12/16/6416>.
12. Sebastian Pingel, Torsten Geipel, Juliane Berghold. Initial Degradation of Industrial Silicon Solar Cells in Solar Panels. Germany, Tenenloye : Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE, 2010. 7 p.
13. Деградація сонячних панелей: як і чому це відбувається? URL: <https://www.solargarden.com.ua/degradatsiya-sonyachnyh-panelej-yak-i-chomu-tse-vidbuvayetsya/?movaUK=UK>.
14. Цих В. С., Кульчак А. М. Особливості деградації сонячних панелей в умовах експлуатації : матеріали І Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні проблеми теплоелектроенергетики та захист довкілля», м. Полтава, 21-22.09.2023 р. С. 21–23.
15. Цих В. С., Кульчак А. М. Дослідження впливу температури на ефективність роботи сонячних фотомодулів : матеріали ІХ міжнародної науково-технічної конференції «Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку», м. Київ, 22-24.11.2023 р. С. 17–18.
16. Чорна В. О., Мельник О. Є., Омельченко О. В., Некрасов А. В., Федь М. Г. Дослідження впливу погодних умов на ефективність роботи фотоелектричної установки. Київ : Таврійський національний університет ім. В. І. Вернадського, 2018. С. 119–124.
17. Панченко В. В., Харін Р. О. Дослідження впливу деградації сонячних панелей на ефективність роботи сонячної електростанції. Харків, Український державний університет залізничного транспорту, 2023. С. 73–82.
18. Архипова Л. М., Смик І. Є. Аналіз впливу метеорологічних умов на ефективність роботи сонячних панелей в Івано-Франківській області. Івано-Франківськ : Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, 2023. С. 99–107.
19. Нечепоренко О. О. Залежність ефективності сонячних панелей від температури навколишнього середовища. Київ : Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського, 2019. С. 574–575.
- Захаров Д. В., Книш Л. І. Математичне моделювання впливу температурного режиму на ефективність сонячної панелі. Дніпро : Дніпропетровський національний університет ім. Олеся Гончара, 2022. С. 48–58.

V. Tsykh<sup>1</sup>, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof., ORCID 0000-0002-9095-4099

A. Kulchak<sup>1</sup>, student, ORCID 0009-0008-5241-1975

A. Yavorskyi<sup>1</sup>, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof., ORCID 0000-0002-5970-4286

<sup>1</sup>Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas

## **ANALYSIS OF RESEARCH ON THE INFLUENCE OF TEMPERATURE ON THE DEGRADATION AND EFFICIENCY OF SOLAR PANELS**

*The article substantiates the relevance of the issue of researching and analyzing the impact of degradation on the efficiency of solar panels. A brief analysis of the main features of the use of solar panels of various types is carried out, their main characteristics that affect their service life are presented. The main types and causes of degradation of photovoltaic modules, which are associated with both mechanical and environmental influences, as well as with the influence of electrical quantities during the operation of solar panels, are considered in detail. The main conclusions about the most influential degradation factors are obtained, among which it is advisable to highlight the influence of temperature - both the external air temperature and the heating temperature of the solar panel itself - for further study. An analysis of current research on the study of the peculiarities of degradation of photovoltaic modules under the influence of various factors associated with both environmental influences and the influence of electrochemical processes directly in the panel system is carried out. Particular attention is paid*

to studies of the effect of temperature on their performance. Preliminary experimental measurements of solar panel performance parameters at different light intensities and when the panel is heated in the range from 19 to 78 °C were carried out on the basis of a laboratory setup. Based on the data obtained, a graph of the dependence of the efficiency of a solar PV module on its surface temperature was constructed and it was found that the efficiency of the panel begins to decline actively after the temperature of its surface rises above 50-55°C. To confirm and detail the data obtained, the next task is to conduct similar studies with different types of solar panels and under different operating conditions. Also, the next step will be to further investigate the impact of ambient temperature on the efficiency of photovoltaic modules, as well as to find a specific link between the impact of this temperature on the heating of solar cells and, accordingly, to assess the impact of these parameters on the degradation of solar panels in general.

**Keywords:** analysis, solar panel, efficiency, degradation, temperature, research

### References

1. Shavarsky V., Tysh E. Basic concepts of solar energy converter systems. Ternopil: Ternopil National Technical University named after Ivan Puluj, 2022. C. 98.
2. Zasekina T. M., Zasekin D. O. Physics (profile level, according to the curriculum of the author's team under the leadership of Loktev V. M.) Section 3. Optics. §47 Photoelectric effect: textbook for 11th grade of general secondary education. Kyiv: Orion Educational and Research Center, 2019. C. 222-229.
3. Streltsov O. A., Shkarupa A. O. Analysis of the features of solar cells. Kharkiv: Kharkiv National University of Radio Electronics, 2022. C. 89-94.
4. Investigation of characteristics and parameters of photovoltaic converters: master's thesis. Kryvyi Rih : Kryvyi Rih State Pedagogical University, 2021. 55 c.
5. Dikhtyarenko BR, Skursky MS Methods for estimating the parameters of solar panel degradation. Kyiv: Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 2020. C. 416-418.
6. Shapoval V. S., Shvedchykova I. O. Influence of environmental factors on the efficiency of solar panels. Kyiv: KNU Technologies and Design, 2019. C. 50-51.
7. Study of the influence of dust deposits on photovoltaic solar panels: Case of Nouakchott. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0973082621000569>.
8. Sustainability | Free-Full-Text | Delamination-and Electromigration-Related Failures in Solar Panels– A Review. URL: <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/12/6882>.
9. Research of the process of restoration of degraded solar panels. Kyiv: KNU Technologies and Design, 2022. C. 27-34.
10. Degradation of solar panels. Kharkiv: Kharkiv National University of Radio Electronics, 2018. C. 152-153.
11. Sustainability | Free-Full-Text | A Comprehensive Evaluation on Types of Microcracks and Possible Effects on Power Degradation in Photovoltaic Solar Panels. URL: <https://www.mdpi.com/2071-1050/12/16/6416>.
12. Sebastian Pingel, Torsten Geipel, Juliane Berghold. Initial Degradation of Industrial Silicon Solar Cells in Solar Panels. Germany, Tenenloye : Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE, 2010. 7 p.
13. Degradation of solar panels: how and why does it happen? URL: <https://www.solargarden.-com.ua/degradatsiya-sonyachnyh-panelej-yak-i-chomu-tse-vidbuvayetsya/?movaUK=UK>.
14. Tsykh V. S., Kulchak A. M. Features of degradation of solar panels in operation: materials of the First International Scientific and Practical Conference "Modern Problems of Heat and Power Engineering and Environmental Protection", Poltava, 21-22.09.2023. C. 21-23.
15. Tsykh V. S., Kulchak A. M. Investigation of the influence of temperature on the efficiency of solar PV modules: materials of the IX International Scientific and Technical Conference "Energy Management: State and Prospects for Development", Kyiv, 22-24.11.2023. C. 17-18.
16. Chorna VO, Melnyk OE, Omelchenko OV, Nekrasov AV, Fed MG. Investigation of the influence of weather conditions on the efficiency of a photovoltaic installation. Kyiv: V. I. Vernadsky Taurida National University, 2018. C. 119-124.
17. Panchenko V. V., Kharin R. O. Investigation of the influence of solar panel degradation on the efficiency of a solar power plant. Kharkiv, Ukrainian State University of Railway Transport, 2023. C. 73-82.
18. Analysis of the influence of meteorological conditions on the efficiency of solar panels in Ivano-Frankivsk region. Ivano-Frankivsk: Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, 2023. C. 99-107.
19. Dependence of solar panel efficiency on ambient temperature. Kyiv: Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 2019. C. 574-575.
20. Mathematical modeling of the effect of temperature on the efficiency of a solar panel. Dnipro: Oles Honchar Dnipro National University, 2022. C. 48-58.

Надійшла: 12.01.2024  
Received: 12.01.2024

## МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ДЛЯ ПОГЛИБЛЕНОГО АНАЛІЗУ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТА УПРАВЛІННЯ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯМ В ЗАКЛАДАХ ОСВІТИ

Фактором національної безпеки держави є зменшення енергозалежності і вжиття заходів з підвищення енергоефективності, а особливо у бюджетній сфері, адже близько 90% таких будівель не відповідають сучасним вимогам енергоефективності. Створення надійної системи управління енергоспоживанням, вибір заходів для зменшення витрати та диверсифікація джерел енергії є непростою задачею, що потребує розгляду процесів енергоспоживання будівель як комплексної проблеми з застосуванням сучасних інструментів системи енергоменеджменту, моделювання, застосування сучасних підходів до автоматизації та вимірювань.

Об'єкт дослідження – процеси енергоспоживання у закладах освіти. Предмет дослідження – енергетичні характеристики та методи управління енергоспоживанням в закладах освіти. Методи дослідження. Аналітичні методи, системний аналіз, синтез, моделювання, систематизація, метод порівняльного і структурного аналізу. Одним із завдань даного дослідження є огляд можливостей програмних продуктів, що можуть використовуватись енергоменеджерами закладів освіти для моніторингу, аналізу і прогнозування енергоспоживання, а також для створення звітності. Також в роботі проведено аналіз стану справ щодо управління енергоспоживанням на прикладі в КПІ ім. Ігоря Сікорського; надано пропозиції для розвитку системи автоматизованого енергомоніторингу, зокрема розроблено архітектуру веб-додатку з урахуванням підтримки існуючих баз даних для покращення процесу енергомоніторингу.

**Ключові слова:** заклад освіти, енергетичний моніторинг, енергоспоживання, енергоефективність, енергоменеджмент.

### Вступ

За останні роки в нашій державі введено в дію низку законів щодо регулювання у сфері енергоефективності, зокрема [1]. Відбувається гармонізація нормативно-правової бази з законодавством ЄС [2], впроваджуються нові ДБН, ДСТУ в сфері підвищення енергоефективності [3]. Зі вступом в дію Постанови КМУ від 23.12.2021 р. [4] обов'язковим є створення служби енергоменеджменту (СЕМ) органами місцевого самоврядування. Систематичний контроль і моніторинг рівня енерговитрат та ресурсів є основою процесу управління енергозбереженням і побудови ефективної СЕМ освітніх закладів. Підвищення енергоефективності об'єктів закладів освіти можливо досягти не лише за допомогою впровадження енергозберігаючих технологій, але й шляхом внесення змін у управління режимом роботи.

Наукові дослідження, що виконувалися на об'єктах закладів освіти включають розвиток підходів до управління енергоспоживанням [5,6], розробку пропозицій щодо розвитку системи енергоменеджменту [7-9] та енергоаудиту [10]; моніторинг [11] та аналіз енергоспоживання фонду будівель [12], моделювання енергетичних характеристик [15] та теплових режимів приміщень до та після впровадження заходів [13], а також розробку методик для прогнозування споживання з урахуванням вагомих факторів впливу [14].

Розвиток системи оперативного управління ефективністю використання паливно-енергетичних ресурсів, зокрема системи контролю та планування енергоспоживання, є актуальною на сьогодні проблемою в Україні. **Метою дослідження** є вивчення методів та засобів для поглибленого аналізу енергетичних характеристик та управління енергоспоживанням в закладах освіти. Дослідження здійснювалися в рамках виконання магістерської дисертації [16-18].

### Матеріал і результати досліджень

**Аналіз програмного забезпечення для енергомоніторингу та аналізу енергоспоживання.** В ході роботи було проведено огляд можливостей окремих поширених в Україні програм для використання енергоменеджерами та фахівцями у сфері енергоаудиту, енергосертифікації, управління споживанням:

-оперативний контроль і диспетчеризація: ACEM, Fela, Фіату, Display, СОКАТЕР, ENSI «Енергомонітор», ENSI «Муніципальне планування енергоефективності», EnergyPlan;

-проектний аналіз: EnergyPlus, DesignBuilder, Reetscreen, MEIC,

-енергообстеження та енергоаудит: DesignBuilder, Audytor-ozc, ENSI EAB.



Розглянуто методи та засоби, що використовувалися різними дослідниками для аналізу енергетичних характеристик об'єктів закладів освіти. Розробка проєктів підвищення енергоефективності з виконанням комплексної термомодернізації будівлі із модернізацією інженерних систем та автоматизації роботи обладнання з дотриманням норм можлива за допомогою енергетичного моделювання. Зокрема, моделювання споживання тепло-, електроенергії та води дослідники виконують у програмних продуктах DesignBuilder, RETScreen [13], EnergyPlus, ENSI [15], Mathcad. Для моделювання теплопередачі для нестандартних вузлів огорожень застосовується програмне забезпечення THERM і Fluent; для розрахунків комбінованої роботи централізованих і автономних джерел часто використовують програмне забезпечення PVSOL та TSOL.

В різних організаціях і територіальних громадах використовують комп'ютерні програми для моніторингу та аналізу споживання енергетичних ресурсів, які в своїй практиці застосовують енергоменеджери для стратегічного планування витрат. В ході дослідження було здійснено огляд можливостей таких програм. Серед відомих програмних продуктів, що використовуються службою енергетичного менеджменту (СЕНМ) можна назвати наступні: Енергоплан, Енергобаланс та АСЕМ (які на ринку з 2010-2011 років), ЕManagement24, UMUNI, АІС "Енергосервіс: облік, контроль, економія", Fela, Фіату, ENSI Енергомонітор [19]. Оскільки програми працюють через браузер, то є змога використовувати її на мобільних пристроях. Проте можуть бути проблеми з відображенням інформації та звітів. Зазвичай робота таких програм налаштована відповідно до структури: організація – структурний підрозділ – установа – будівля; кожен з елементів структури має можливий рівень доступу (наприклад, відповідальна особа за енергоспоживання одного структурного підрозділу не може мати доступ до зведеної інформації по іншому підрозділу, проте її може аналізувати керівний склад). Найвний гнучкий механізм розподілу ролей та рівнів доступу для різних типів користувачів. Нижче для прикладу показано робоче вікно програмного продукту вітчизняного виробництва АСЕМ (рис. 1).

Важливі функції та показники, що накопичуються, характерні для програмного забезпечення, що використовується енергоменеджерами, зображено в табл.1. Наведена інформація є важливою складовою автоматизованого робочого місця енергоменеджера.

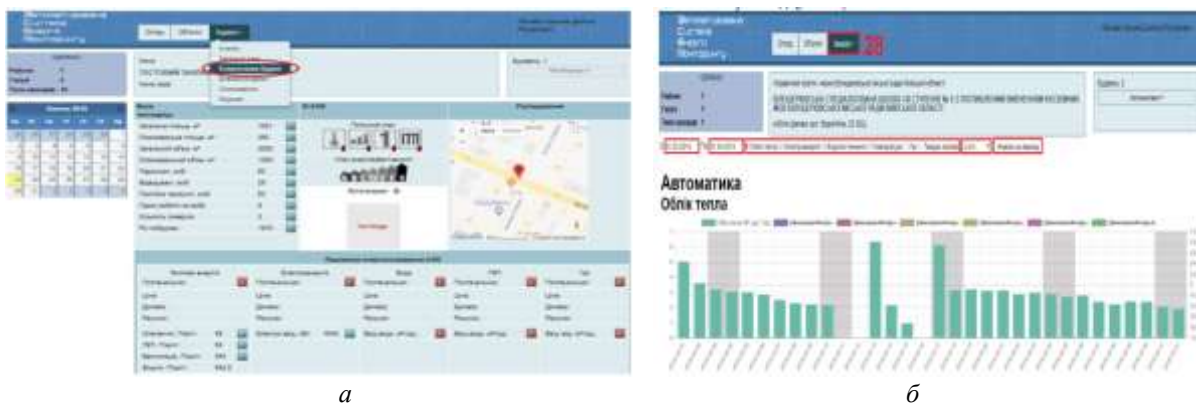


Рисунок 1 – Програмний продукт для моніторингу енергоспоживання АСЕМ  
а - робоче вікно програми «Будівля», б – робоче вікно «Автоматика/облік тепла»

Таблиця 1 – Функції програмного забезпечення для робочого місця енергоменеджера

Бази даних		Моніторинг			Автоматизація
показники	документи	енергія	ресурси	мікроклімат	- сигнали про аварії, нештатні ситуації, візуалізація результатів, управління роботою обладнання
- покази лічильників ПЕР, - питоме споживання, - нормативи, - клас енергоефективності	-законодавство, - форми звітності, - накази та ін., - методики, - паспорти на будівлі та обладнання, ін.	- комер. та техн. облік, - параметри енергії, - порівняльний аналіз, - накопичування	- хол. вода, - ГВП, - газ, - паливо, - ел.ен., ін.	- внутр. температура, - вологість, - CO <sub>2</sub> , - освітленість, - режим експлуатації, та ін.	

Система моніторингу має працювати як не лише технічний засіб обліку та контролю витрат, але й як інструмент, що забезпечує можливість управління процесами енергоспоживання підвищення енергоефективності. Окрім програмні продукти дозволяють на автоматизованому робочому місці енергоменеджера (АРМ) проводити енергомоніторинг в реальному часі, а також мають мобільний застосунок (АСЕМ, READy, Energy Lens та ін.).

Для створення системи віддаленого моніторингу потрібно забезпечити можливість передачі показів з лічильників на об'єкті для подальшої обробки інформації на робочому місці енергоменеджера. Інтелектуальні системи обліку електроенергії надають значні переваги як для енергетичної системи, так і для кінцевих користувачів і допомагають зменшити витрати на експлуатацію та обслуговування мережі завдяки кращому управлінню та оптимізації. До 2024 року планується, що майже 77% європейських споживачів матимуть розумні лічильники для електроенергії, а близько 44% для газу. Середня вартість встановлення розумного лічильника в ЄС становить від 180 до 200 євро. За даними пілотних проектів в ЄС, середній рівень економії енергії становить не менше 2%, а в деяких випадках до 10% [20].

В дослідженні проведено вивчення доступних технологій для дистанційного збору даних з приладів обліку. Традиційно для вимірювання енергоспоживання в Україні використовувалися електромеханічні лічильники або прості електронні лічильники, що вимагають від постачальників виїзду на місце для зчитування показів. Розумний лічильник представляє собою електронний пристрій, який фіксує та передає інформацію щодо споживання. Після цього дані зазвичай зберігаються на сервері, де їх використовують для подальших операцій, таких як розрахунок оплати за споживання, відображення статистики використання або подання іншої інформації. Отримання доступу до первинних баз даних здійснюється через цифрові комунікаційні інтерфейси цих лічильників за допомогою оригінальних протоколів, розроблених виробниками цих пристроїв. Механічні лічильники тепла визначають споживання енергії на основі фізичних процесів у пристрої. Вони зазвичай надійні та мають довгий термін служби, проте їхня точність може страждати від зносу механізмів. Ультразвукові лічильники використовують звукові хвилі для вимірювання споживаної енергії, що дозволяє їм бути точними та менше піддатливими зносу і надає можливість забезпечувати збір та аналіз даних. Електромагнітні лічильники використовують принцип дії, що базується на здатності потоку рідини, проходячи через магнітне поле, генерувати електричний струм. Для впровадження системи дистанційного моніторингу потрібно модернізувати вузли обліку теплової енергії: або замінити їх на більш сучасні, або встановити додаткові пристрої, які забезпечують зчитування даних через мережу і передачу даних на АРМ енергоменеджера. Особливості систем автоматизованого моніторингу наведено на рис.2.



Рисунок 2 – Особливості системи автоматизованого моніторингу

### Системи управління енергоспоживанням студмістечка КПІ

Кампус КПІ, що складається з близько 50 будівель різного призначення, має власні інженерні мережі. В КПІ ім. Ігоря Сікорського створена СЕМ (рис.3, [8]), основною метою роботи якої є зменшення витрат на паливно-енергетичні та інші ресурси за допомогою впровадження організаційних і технічних заходів з енергозбереження. Функціонування СЕМ включає в себе розробку енергетичної політики та програми енергоефективності [21], оптимізацію планування витрат, енергетичний моніторинг, аналіз показників та розробку заходів з енергозбереження, з урахуванням технічних, економічних та екологічних аспектів. СЕМ активно залучає науковий потенціал університету та студентів для виконання енергообстежень, підвищуючи якість освітніх послуг [8].

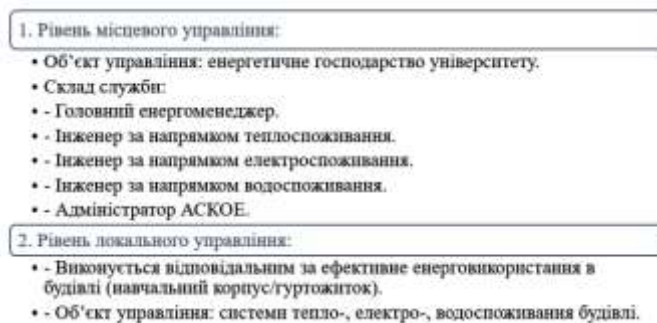


Рисунок 3 – Система управління енергоспоживанням

Розглянемо концепцію створення системи автоматизованого енергомоніторингу та управління енергоспоживанням на прикладі студмістечка КПІ ім.Ігоря Сікорського. Дистанційний облік споживання ПЕР забезпечується основні даних, отриманих безпосередньо від вузлів обліку теплової енергії, електричної енергії, холодної води, а також відбувається збір інформації про аварійні сигнали та температуру повітря всередині приміщень [11]. Система включає: 1) Спеціалізоване програмне забезпечення з різними правами доступу споживачів (для збору, аналізу інформації, керування та інтерактивної взаємодії, а також для створення звітів); 2) використання датчиків (вимірювання температури, вологості, освітленості, витрат, рівня CO<sub>2</sub>); 3) оцифрована та наповнена база даних інженерних мереж, лічильників та будівель. Для можливості якісного управління процесами енергоспоживання аналітичний блок програмного продукту має забезпечувати можливість проведення статистичного, кластерного, порівняльного аналізу; виконувати розрахунки енергобалансів та базового рівня енергоспоживання за затвердженими методиками; оцінювати потенціалу енергозбереження. Це в комплексі дозволить також визначати рейтинг структурних підрозділів університету за рівнем енергоефективності та прогнозувати витрати на енергоспоживання з урахуванням різних факторів впливу.

#### **Пропозиції по розробці серверної та клієнтської частини мобільного додатка для збору даних**

Розробка серверної та клієнтської частини мобільного додатка для збору та візуалізації даних з різних лічильників університетського комплексу є важливим кроком у вдосконаленні системи моніторингу та управління ресурсами університету. Даний розділ присвячений детальному опису функціоналу серверної частини для збору даних та клієнтської системи для їх візуалізації. Наразі зібрані дані з лічильників зберігаються в EXCEL таблицях, мінусами такої організації є наступне:

- проблеми з передачею та збереженням даних (дані зберігаються на ПК у користувачів, для того щоб користуватись всіма опціями EXCEL потрібно мати встановлений редактор та зберігати копію файлу);
- проблеми з безпекою даних (файли можуть бути втрачені, а лічильники зберігають дані обмежений час);
- проблеми з розробкою нових рішень для візуалізації та групування даних (всі рішення мають бути розроблені в програмі EXCEL, що має обмежений функціонал).

Тому кращим рішенням буде відмовитись від EXCEL та зберігати дані в базах даних, а потім візуалізувати їх у будь-якому зручному вигляді, не прив'язуючись до обмежень EXCEL. Додаток (рис. 4) має зчитувати дані з різних джерел, типів лічильників з різними форматами даних та способами передачі цих даних. Для кожного з різних видів даних потрібен свій парсер, що буде приводити дані до загального формату. Потім ці дані записуються до бази даних та стають доступними для зчитування та приведення їх у потрібний вигляд, залежно від запиту.

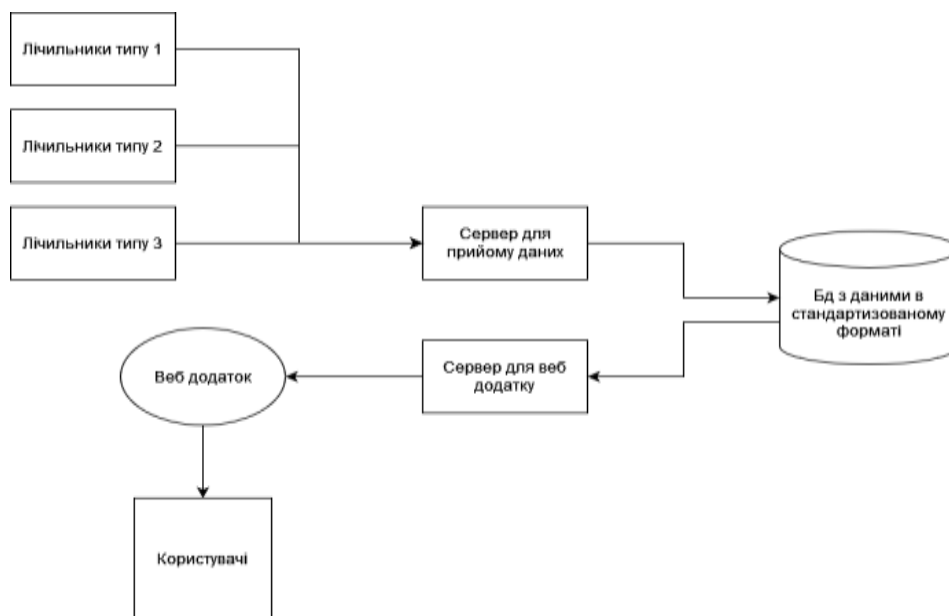


Рисунок 4 – Схема додатку

Серверна частина додатка має за мету приймати дані з різних лічильників університетського комплексу. Для досягнення цієї мети сервер обладнаний різними парсерами для адаптації різноманітних форматів даних, які надходять від різних типів лічильників. Ці дані стандартизуються та конвертуються у загальний формат перед збереженням у базі даних. Одним з ключових аспектів розробки серверної частини є забезпечення адекватного механізму зберігання та обробки даних, отриманих з лічильників

різних типів та форматів. Це вимагає створення гнучкої структури, яка забезпечить зручний доступ до інформації для подальшого використання у клієнтській частині додатка.

Розробка серверної частини вимагає ретельного вибору технологій. Для реалізації адаптерів для різних форматів даних можна використовувати мови програмування з великою кількістю бібліотек для роботи з різними протоколами передачі (наприклад, Node JS або Java). Важливо створити гнучку архітектуру, яка дозволить легко додавати нові типи лічильників без необхідності переписування вже наявного коду. Застосування патернів проектування, таких як Factory Method або Strategy, дозволить ефективно розширювати систему. Оскільки сервер обробляє конфіденційні дані, необхідно ретельно працювати над захистом системи. Використання шифрування при передачі та зберіганні даних, а також застосування автентифікації та авторизації для керування доступом до інформації, є критичними аспектами розробки. Обрана база даних повинна відповідати вимогам щодо швидкодії та надійності. Реляційні бази даних, такі як PostgreSQL або MySQL, можуть бути ефективними для зберігання структурованих даних. Необхідно уникати дублювання даних та оптимізувати запити до бази даних. Для цього можна використовувати індексацію, яка прискорить пошук і підвищить продуктивність системи.

Клієнтська частина додатка є важливою для забезпечення доступу та візуалізації даних для кінцевих користувачів. Вона складається з веб-інтерфейсу та серверної частини, яка відповідає за відображення та обробку даних з бази даних. Користувачі мають можливість переглядати таблиці, графіки, а також використовувати фільтри для відображення конкретних об'єктів або груп об'єктів. Окрім цього, важливим елементом є наявність адміністративної панелі для керування користувачами, що дозволяє регулювати доступ до даних та функціоналу для різних типів користувачів (рис. 5).

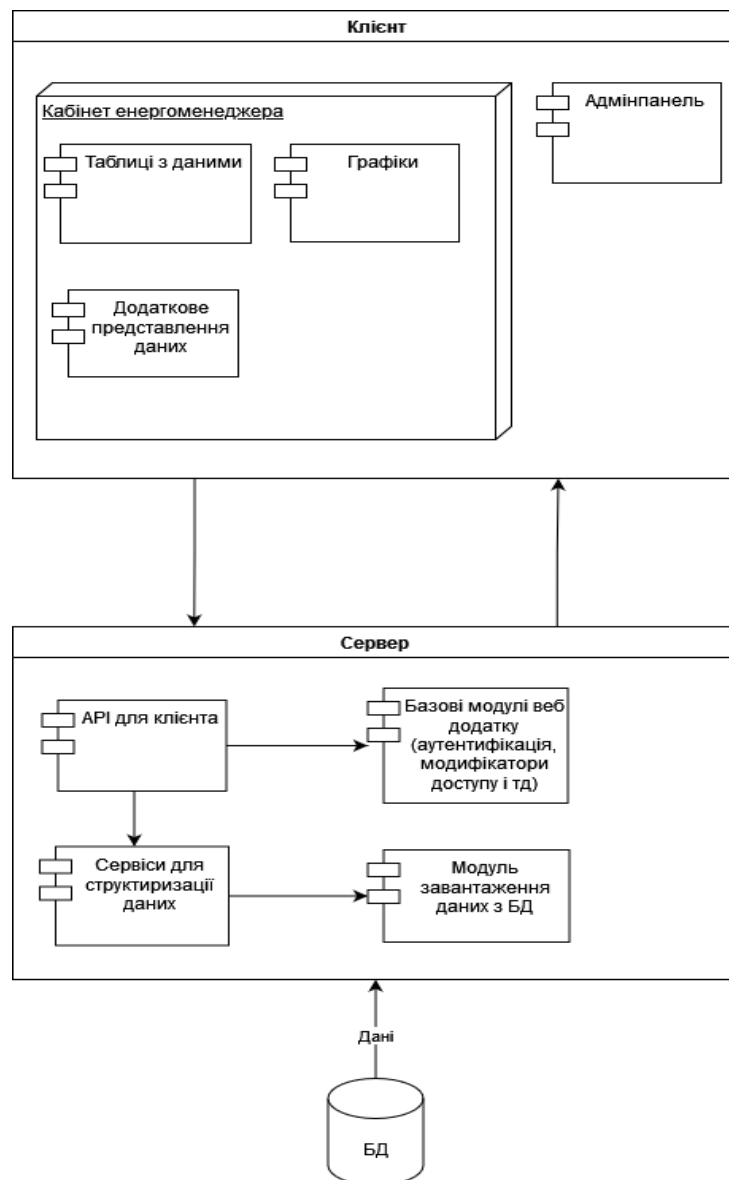


Рисунок 5 – Схема веб додатку та веб сервера

Додаток має бути доступний з будь-якого пристрою, що має доступ до інтернету та веб-браузер, що значно розширює його можливість застосування. Ця частина додатку має забезпечити зручний та інтуїтивно зрозумілий інтерфейс для взаємодії з даними, що стосуються ресурсів університетського комплексу. Веб додаток повинен мати обмеження доступу користувача до даних в залежності від прав доступу типу користувача. Можливі обмеження доступу показано на рис. 6.

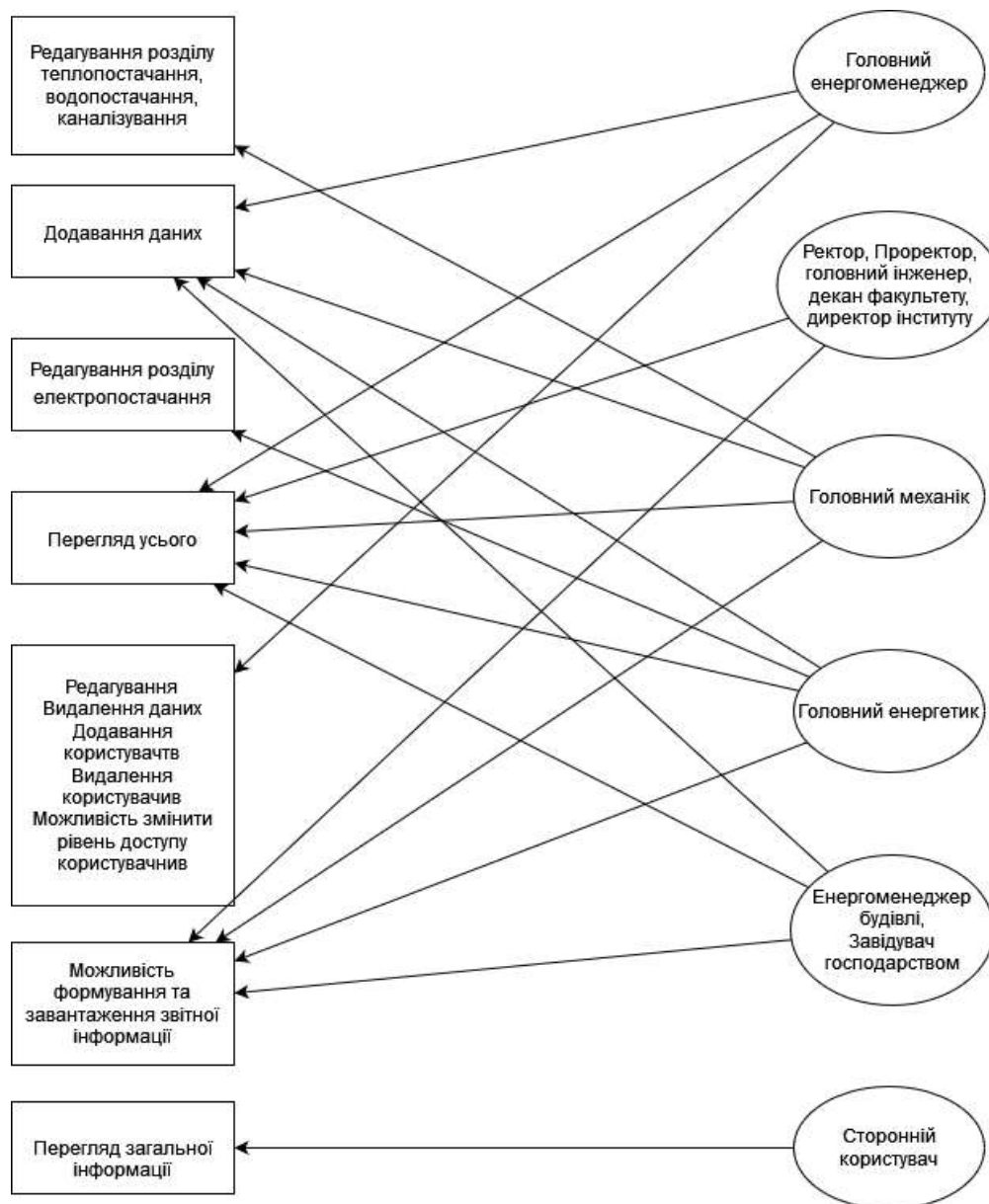


Рисунок 6 – Можливе розмежування доступу до даних

Важливим елементом є наявність адміністративної панелі для керування доступом та конфігурацією додатку. Можливості керування правами користувачів, моніторинг системи та журналування дій важливі для підтримки та безпеки системи.

Додаток матиме основні сторінки:

- сторінки з даними: сторінки, на яких відображені всі дані, зібрані з лічильників, відфільтровані по типам лічильників, об'єктам та групам об'єктів. Також, в залежності від доступу, користувач може вносити зміни у ці дані;
- сторінки з графіками та згенерованими таблицями;
- сторінки формування звітів за шаблоном;
- сторінки з картою об'єктів та вузлів, по яким збираються дані (адреса, рік побудови, лічильники об'єкта і тд.) та посилання на зв'язану з ним сторінку об'єкта;
- сторінка об'єкта (детальна інформація та посилання на всі сторінки, пов'язані з об'єктом - дані, графіки та таблиці).

**Висновки:**

1. Регулярний моніторинг та аналіз споживання енергії є основою ефективної системи енергетичного менеджменту. Залежно від поставлених завдань енергоменеджери використовують різні інструменти та програмні продукти. Проведений в ході дослідження огляд буде корисним для застосування у практичній діяльності енергоменеджерів, інженерів-енергетиків, енергоаудиторів та фахівців у сфері управління енергоспоживанням житлово-комунального господарства.

2. Налагоджування автоматизації процесів зчитування даних і передачі на робоче місце енергоаудитора є важливою умовою оперативного моніторингу і контролю. Це дозволить контролювати витрати ресурсів та енергії, управляти режимами енергоспоживання, планувати і прогнозувати витрати, створювати звітність, визначати фактичну економію і стимулювати персонал. В ході дослідження було детально розглянуто різні інструменти для зчитування даних з лічильників, їх можливості, переваги та недоліки.

3. Перспективним є створення мобільних додатків із різним ступенем доступу до бази даних щодо енергоспоживання та характеристик будівлі та обладнання залежно від ступеня залученості персоналу до управління витратами закладу чи організації. Пропонується розробити додаток, який буде доступний як на ПК, так і на смартфоні. Система буде збирати та зберігати дані з лічильників, які потім можна буде вивантажити та відобразити у будь-якому потрібному форматі для користувача. Також доступ до даних буде розділено в залежності від посади та доступу користувача до них.

**Список використаної літератури**

1. Закон України «Про енергетичну ефективність будівель». Законопроект № 2118-VIII // Відомості Верховної Ради (ВВР), 2017, № 33, ст.359.
2. ДСТУ ISO 50001:2020 Системи енергетичного менеджменту. Вимоги та настанова щодо використання. (ISO 50001:2018, IDT) –(Державний стандарт України).
3. ДБН В.2.6-31:2021 Теплова ізоляція та енергоефективність будівель
4. Порядок впровадження систем енергетичного менеджменту // Затв. постановою КМУ від 23 грудня 2021 р. № 1460 – 17 с.
5. Управління економічного та інтеграційного розвитку. Підвищення енергоефективності в будівлях навчальних закладів м.Івано-Франківська [Електронний ресурс] / Управління економічного та інтеграційного розвитку – Режим доступу: <http://www.mvk.if.ua/kperozv/32062>.
6. Управління ефективністю енерговикористання об'єктів галузі освіти / Білоус І.Ю., Дешко В.І., Сплавська В.О., Суходуб І.О., Шевченко О.М., Шовкалюк М.М.; під заг. ред. В.І. Дешка / Монографія [Електронний ресурс] – К.: НТУУ «КПІ», 2015. 157 с. – Режим доступу: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/11887>.
7. Дешко В.І. Досвід створення та функціонування системи енергоменеджменту у ВНЗ / В.І. Дешко, О.М. Шевченко, М.М. Шовкалюк, І.О. Суходуб, М.І. Сотник, Н.П. Соколова // Енергетика: економіка, технології, екологія – 2016. - №2. – с. 34-46.
8. Шевченко О.М. Енергоефективний кампус КПІ: інструменти та методи досліджень / Шевченко О.М., Шовкалюк М.М. // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. Серія Технічні науки. - 2019. - № 4 (136). - С. 97-105. – Режим доступу: <https://jrn1.knurd.edu.ua/index.php/bknurd/article/view/410>.
9. Концепція розробки та реалізації програми енергоефективності закладу вищої освіти на прикладі КПІ ім. Ігоря Сікорського / О.М. Шевченко, М.М.Шовкалюк. Енергетика і автоматика. №4. 2021. С.49-62. – Режим доступу: <http://journals.nubip.edu.ua/index.php/Energiya/issue/view/669>.
10. Соловей О.І., Шевченко О.М., Білоус І.Ю. Оцінка рівня ефективності енергоспоживання об'єктів житлового комплексу (на прикладі гуртожитків НТУУ «КПІ»). Будівельні конструкції: Міжвідомчий науково-технічний збірник наукових праць. 2013. № 77. С. 293-297.
11. Розвиток системи автоматизованого моніторингу та аналізу енергоспоживання в КПІ ім.Ігоря Сікорського / Шевченко О.М., Шовкалюк М.М., Степанець О.В., Швайко В.Г. Енергетика: економіка, технології, екологія. № 3 (65). 2021. С.93-100. – Режим доступу: <http://energy.kpi.ua/article/view/251265>.
12. Каплун В. В., Щербак В. Г. Багатофакторний критеріальний аналіз енергетичної ефективності будівель вищого навчального закладу. Бухгалтерський облік, аналіз і аудит. 2016. С. 349 – 359.
13. Шовкалюк М.М., Ващишин Р.Л. Аналіз енергетичних характеристик будівлі навчального корпусу складної конфігурації із розробкою пропозицій по підвищенню енергоефективності. Технології та інжиніринг, 2021. № 3. С.49-59. – Режим доступу: <http://vistnuk.knurd.edu.ua/project/32021/>
14. Шовкалюк, М. М. Войналович Н. О. Застосування регресійних залежностей для прогнозування теплоспоживання навчальних корпусів. Молодий вчений, 2015. № 5 (20), Ч. 1. С. 57–61.
15. М.М.Шовкалюк, І.Ю. Білоус. Аналіз енергетичних і матеріальних показників і балансів навчального закладу з розробкою енергозберігаючих заходів. Екологічні науки 2014. № 1/2014 (5). с. 108-115. – Режим доступу: <http://econj.dea.kiev.ua/archives/2014/5/16.pdf>

16. Шовкалюк М.М., Васильцов Д.А. Програмні продукти та інструменти моніторингу і аналізу енергоспоживання для енергоменеджерів // Збірник наук. праць IX міжнар. наук.-техн. та навч.-метод. конф. "Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку – REMS'2023". [Київ, 22-24 листопада 2023 р.]

17. Шовкалюк М.М., Васильцов Д.А. Огляд засобів і методів для моніторингу енергоспоживання // Mechanisms of Scientific and Technical Potential Development: Proceedings of the 3rd International Scientific and Practical Internet Conference [Dnipro, Ukraine, 23-24.11.2023 p.] с.173-175. – Режим доступу: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/63401>

18. Васильцов Д.А. Методи та засоби для поглибленого аналізу енергетичних характеристик та управління енергоспоживанням в закладах освіти. – К.КПІ ім.Ігоря Сікорського, 2023. 124 с.

19. Експертний огляд програмного забезпечення для енергомоніторингу та енергоменеджменту [Електронний ресурс] // Асоціація «Енергоефективні міста України». 2018.

20. Smart grids and meters // Energy, Climate change, Environment – Режим доступу: [https://energy.ec.europa.eu/topics/markets-and-consumers/smart-grids-and-meters\\_en](https://energy.ec.europa.eu/topics/markets-and-consumers/smart-grids-and-meters_en)

21. Програма з енергоефективності КПІ ім. Ігоря Сікорського на 2021-2024 р.р. – К.: КПІ, 2020. 76 с. – Режим доступу: [https://document.kpi.ua/files/2021\\_HGF-106.pdf](https://document.kpi.ua/files/2021_HGF-106.pdf)

**M. Shovkaliuk<sup>1</sup>**, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, ORCID 0000-0002-1898-3493

**D. Vasytsov<sup>1</sup>**, master student, ORCID 0009-0002-2999-9789

<sup>1</sup>**National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”**

## **METHODS AND TOOLS FOR IN-DEPTH ANALYSIS OF ENERGY CHARACTERISTICS AND MANAGEMENT OF ENERGY CONSUMPTION IN EDUCATIONAL INSTITUTIONS**

*A factor of the state's national security is reducing energy dependence and taking measures to increase energy efficiency, especially in the budgetary sphere, because about 90% of such buildings do not meet modern energy efficiency requirements. Creating a reliable energy consumption management system, choosing measures to reduce consumption and diversifying energy sources is a difficult task that requires consideration of building energy consumption processes as a complex problem with the use of modern tools of the energy management system, modeling, and the use of modern approaches to automation and measurements.*

*The object of research is energy consumption processes in educational institutions. The subject of the research is energy characteristics and methods of energy consumption management in educational institutions. Research methods. analytical methods, system analysis, synthesis, modeling, systematization, method of comparative and structural analysis. One of the tasks of this study is to review the capabilities of software products that can be used by energy managers of educational institutions to monitor, analyze and forecast energy consumption, as well as to create reports. Also in the work, an analysis of the state of affairs regarding energy consumption management was carried out on the example of KPI named after Igor Sikorskyi; proposals for the development of the automated energy monitoring system were provided, in particular, the architecture of the web application was developed taking into account the support of existing databases to improve the energy monitoring process.*

**Keywords:** *educational institution, energy monitoring, energy consumption, energy efficiency, energy management.*

### **References**

1. Law of Ukraine "On Energy Efficiency of Buildings". Draft Law No.2118-VIII // Bulletin of the Verkhovna Rada, 2017, No.33, p.359.

2. DSTU ISO 50001:2020 Energy management systems. Requirements and instructions. (ISO 50001:2018, IDT).

3. DBN V.2.6-31:2021 Thermal insulation and energy efficiency of buildings

4. Procedure for implementing energy management systems // Approved. Resolution of the Cabinet of Ministers of December 23, 2021 No.1460 – 17 p.

5. Department of Economic and Integration Development. Increasing energy efficiency in the buildings of educational institutions in Ivano-Frankivsk [Electronic resource] / Office of Economic and Integration Development - Access mode: <http://www.mvk.if.ua/kperozv/32062>.

6. Energy efficiency management of educational facilities / Bilous I.Yu., Deshko V.I., Splavska V.O., Sukhodub I.O., Shevchenko O.M., Shovkaliuk M.M.; under general ed. V.I. Dshka / Monograph [Electronic resource] - K.: NTUU "KPI", 2015. 157 p. – Access mode: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/11887>.
7. Dshko V.I. Experience in the creation and functioning of the energy management system in universities / V.I. Dshko, O.M. Shevchenko, M.M. Shovkaliuk, I.O. Sukhodub, M.I. Sotnyk, N.P. Sokolova // Energy: economy, technologies, ecology - 2016. №2. – p. 34-46.
8. Shevchenko O.M. Energy-efficient campus of KPI: research tools and methods / O.M. Shevchenko, M.M. Shovkaliuk. // Bulletin of the Kyiv National University of Technology and Design. Series Technical sciences. - 2019. - No. 4 (136). - P. 97-105. – Access mode: <https://jrn.knutd.edu.ua/index.php/bknuj/article/view/410>.
9. The concept of development and implementation of the energy efficiency program of a higher education institution based on the example of KPI named after Igor Sikorsky / O.M. Shevchenko, M.M. Shovkaliuk. Energy and automation. No. 4. 2021. P.49-62. – Access mode: <http://journals.nubip.edu.ua/index.php/Energiya/issue/view/669>.
10. Solovei O.I., Shevchenko O.M., Bilous I.Yu. Assessment of the level of efficiency of energy consumption of objects of the residential complex (on the example of the dormitories of NTUU "KPI"). Building structures: Interdepartmental scientific and technical collection of scientific works. 2013. No. 77. P. 293-297.
11. Development of the system of automated monitoring and analysis of energy consumption in Igor Sikorskyi KPI. Shevchenko O.M., Shovkaliuk M.M., Stepanets O.V., Shvayko V.G. Energy: economy, technologies, ecology. No. 3 (65). 2021. P.93-100. – Access mode: <http://energy.kpi.ua/article/view/251265>.
12. Kaplun V.V., Shcherbak V.G. Multifactor criterion analysis of the energy efficiency of buildings of a higher educational institution. Accounting, analysis and audit. 2016. P. 349 – 359.
13. Shovkaliuk M.M., Vashchyshyn R.L. Analysis of the energy characteristics of the building of the educational building of a complex configuration with the development of proposals for increasing energy efficiency. Technologies and engineering 2021. No. 3. P.49-59. – Access mode: <http://vistnik.knutd.edu.ua/project/32021/>
14. Shovkaliuk, M.M. Voinalovich N.O. Application of regression dependences for forecasting heat consumption of educational buildings. Young scientist, 2015. No. 5 (20), Part 1. P. 57–61.
15. M. Shovkaliuk, I. Bilous. Analysis of energy and material indicators and balance sheets of the educational institution with the development of energy-saving measures. Environmental Sciences 2014. No. 1/2014 (5). P. 108-115. – Access mode: <http://ecoj.dea.kiev.ua/archives/2014/5/16.pdf>
16. Shovkaliuk M.M., Vasylytsov D.A. Software products and tools for energy consumption monitoring and analysis for energy managers // Collection of Sciences. Proceedings of the IX International science and technology and teaching method. conf. "Energy management: status and development prospects - PEMS'2023". [Kyiv, November 22-24, 2023]
17. Shovkaliuk M.M., Vasylytsov D.A. Review of means and methods for energy consumption monitoring // Mechanisms of Scientific and Technical Potential Development: Proceedings of the 3rd International Scientific and Practical Internet Conference [Dnipro, Ukraine, November 23-24, 2023] pp. 173-175. – Access mode: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/63401>
18. Vasylytsov D.A. Methods and tools for in-depth analysis of energy characteristics and management of energy consumption in educational institutions. - K.KPI named after Igor Sikorskyi, 2023. 124 p.
19. Expert review of software for energy monitoring and energy management [Electronic resource] // Association "Energy-efficient cities of Ukraine". - 2018.
20. Smart grids and meters // Energy, Climate change, Environment – Access mode: [https://energy.ec.europa.eu/topics/markets-and-consumers/smart-grids-and-meters\\_en](https://energy.ec.europa.eu/topics/markets-and-consumers/smart-grids-and-meters_en)
21. Program on energy efficiency of KPI named after Igor Sikorsky for 2021-2024 - K.: KPI, 2020. 76 p. – Access mode: [https://document.kpi.ua/files/2021\\_HGF-106.pdf](https://document.kpi.ua/files/2021_HGF-106.pdf)

Надійшла: 15.04.2024  
Received: 15.04.2024



В.П. Калінчик<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0003-4028-0185  
 О.В. Мейта<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0002-4132-5202  
 В.В. Калінчик<sup>1</sup>, канд. техн. наук, ORCID 0000-0003-3931-646X  
 В.А. Побігало<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0003-2673-7329  
 О.В. Бориченко<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0002-6127-2945  
<sup>1</sup>Національний технічний університет України  
 «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## СТАТИСТИЧНІ ОЦІНКИ ВЕЛИЧИН, ВИЗНАЧАЛЬНИХ ІНТЕРВАЛ КОНТРОЛЮ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ПОТУЖНОСТІ

Показано, що цифрова обробка інформації про електроспоживання можлива при перетворенні досліджуваного процесу в дискретну форму. Правильний вибір інтервалу контролю дозволяє з достатньою мірою точності відновити значення досліджуваної функції в інтервалах між вимірами. Показано, що при організації контролю середньої потужності необхідно вибирати такий інтервал дискретизації, який би забезпечував адекватне представлення поточного процесу. Запропонована процедура вибору інтервалу контролю електричної потужності, яка заснована визначенні тривалості викиду випадкової функції зміни електричної потужності за деяке введене обмеження. Обґрунтована кількість дослідів контролю для визначення оптимального інтервалу контролю електричної потужності. Показано, що найбільш раціональним методом обробки експериментальних даних буде метод спільного визначення оцінок для кореляції і середньоквадратичного відхилення.

**Ключові слова:** електроспоживання, потужність, дискретизація, контроль.

**Вступ.** Фізичний процес електроспоживання є безперервною функцією часу. Для вимірювання та подальшої обробки інформації про електроспоживання необхідно перетворити досліджуваний процес у дискретну форму. Правильний вибір інтервалу контролю (дискретизації)  $\Delta t$  дозволяє з достатньою мірою точності відновити значення досліджуваної функції в інтервалах між вимірами.

При організації контролю середньої за період  $T$  потужності необхідно вибирати такий інтервал дискретизації, який би забезпечував адекватне представлення поточного процесу. Очевидно, найпростіший спосіб досягнення такої мети - це вибір досить малого інтервалу дискретизації. Однак надмірна обробка інформації небажана з точки зору функціонування системи.

Таким чином, виникає завдання визначення такого інтервалу дискретизації, який би задовольняв як вимогам до якості контролю процесу, так і можливостям апаратних засобів. При цьому величина інтервалу повинна бути обрана з розумного компромісу між вимогами точності та економічності [1-4].

**Метою роботи** є вибір оптимального інтервалу дискретизації для контролю електричної потужності.

**Викладення основного матеріалу.** При контролі електричної потужності, усередненої за час  $T$  вибір кроку дискретизації заснований на визначенні тривалості викиду випадкової функції за деяке введене обмеження  $L$ . Введемо в розгляд величину  $l(t) = L - M(t)$ . Очевидно, що, якщо розглядати флуктуацію випадкового процесу  $x(t)$  за рівень  $l(t)$ , то це буде еквівалентно розгляду викидів процесу  $Y(t)$  за рівень  $L$

Щільність розподілу тривалості викидів за рівень  $l(t)$  визначається [1]

$$f(\Delta) = 2 \int_0^{\infty} f_s \left( \dot{x}, -2 \frac{\dot{x}}{\Delta} \right) \frac{\dot{x}}{\Delta^2} d\dot{x} \quad (1)$$

Для визначення функції розподілу тривалості викидів (1) треба проінтегрувати від нуля до  $\Delta$ , тобто

$$F(\Delta) = \int_0^{\Delta} f_s(\Delta) d\Delta. \quad (2)$$

Підставляючи (1) в (2) отримаємо:

$$F(\Delta) = 2 \int_0^{\Delta} \int_0^{\infty} f_s \left( \dot{x}, -2 \frac{\dot{x}}{\Delta} \right) \frac{\dot{x}}{\Delta^2} d\dot{x} d\Delta. \quad (3)$$

Відповідно до [1], (3) матиме вигляд:

$$F(\bar{\Delta}) = A \int_0^{\bar{\Delta}} \frac{d\Delta}{\Delta^2} \int_0^{\infty} \dot{x}^2 \exp[-a\dot{x}^2 + b\dot{x}] d\dot{x}, \quad (4)$$

де:

$$A = \frac{2 \exp(-C)}{\sigma^2 R_2 \sqrt{2\pi\sigma^2\rho}}; \quad (5)$$

$$a = \frac{2\Delta^2\rho + 4R_2}{\sigma^2\Delta^2\rho}; \quad (6)$$

$$b = \frac{2R_2^2 l(t)}{\sigma^2\Delta^2\rho}; \quad (7)$$

$$c = \frac{R_2^3\gamma^2}{2\rho}; \quad (8)$$

$$\rho = R_4 - R_2^2; \quad (9)$$

$$\gamma = \frac{l(t)}{\sigma}. \quad (10)$$

В [1] було показано, що

$$R_2 = -\frac{1}{2}R''(0). \quad (11)$$

$$R_4 = -\frac{1}{24}R^{IV}(0). \quad (12)$$

Величину  $R''(0)$  приблизно можна представити через різницю другого порядку:

$$R''(0) = \frac{R(\delta) - 2R(0) + R(-\delta)}{\delta^2}. \quad (13)$$

Враховуючи парність функції  $R(\tau)$ , той факт, що  $R(0) = 1$  і підставляючи (13) в (11) отримаємо

$$R_2 = \frac{1 - R(\delta)}{\delta^2}. \quad (14)$$

Аналогічно, підставляючи величину  $R^{IV}(0)$  через різницю четвертого порядку отримаємо

$$R^{IV}(0) = \frac{R(2\delta) - 4R(\delta) + 6R(0) - 4R(-\delta) + R(-2\delta)}{\delta^4}$$

або

$$R^{IV}(0) = \frac{3 - 4R(\delta) + R(2\delta)}{\delta^4}. \quad (15)$$

Таким чином, замість того щоб оцінювати  $R_2$  і  $R_4$ , оцінимо величини  $R(\delta)$  і  $R(2\delta)$ .

Очевидно, що методика визначення оцінок  $R(\delta)$  і  $R(2\delta)$  – однакова. Позначимо через  $\hat{R}$  оцінку  $(\delta)$ , або  $R(2\delta)$ . Тоді неважко показати, що незміщену оцінку величини  $\hat{R}$  можна у вигляді:

$$\hat{R} = \frac{\sum_{k=1}^n x_k x_{k+1}}{\sqrt{\sum_{k=1}^n x_k^2 \sum_{k=1}^n x_{k+1}^2}},$$

де  $x_k$  – експериментальні значення досліджуваного випадкового процесу в дискретні моменти часу, віддалені один від одного на  $\delta(2\delta)$ ;  $n+1$  – кількість експериментальних точок.

Надалі, згідно [5] щільність  $f_n(\rho)$  оцінки  $\hat{R}$  подається у вигляді:

$$f_n(\rho) = \frac{1}{\pi(n-3)!} (1 - R^2)^{\frac{n-1}{2}} (1 - \rho^2)^{\frac{n-4}{2}} \frac{d^{n-2}}{d(R\rho)^2} \cdot \frac{\arccos(-R\rho)}{\sqrt{1 - R^2\rho^2}}. \quad (16)$$

Очевидно, що (16) має місце тільки в інтервалі  $[-1,1]$ , поза яким  $f_n(\rho) = 0$ .

Слідкуючи [6] можна визначити довірчий інтервал величини  $R$ , відповідний довірчому коефіцієнту  $\alpha$ :

$$th\left(\frac{1}{2} \ln \frac{1+\hat{R}}{1-\hat{R}} - \frac{\varepsilon_\alpha}{\sqrt{n-3}}\right) < R < th\left(\frac{1}{2} \ln \frac{1+\hat{R}}{1-\hat{R}} + \frac{\varepsilon_\alpha}{\sqrt{n-3}}\right), \quad (17)$$

де  $th(y) = \frac{e^{2y}-1}{e^{2y}+1}$  – гіперболічний тангенс,  $\Phi(\bullet)$  – функція Лапласа.

Зазначимо, що оцінка (17) буде справедливою для  $n \geq 25$ .

Визначення довірчого інтервалу може бути виконано також за допомогою таблиць функції розподілу величини  $\hat{R}$

$$F_n(\xi) = \int_{-1}^{\xi} f_n(\rho) d\rho,$$

складених Девідом [7].

Таким чином, не є принциповою складністю оцінка довірчого інтервалу величини  $R$ . Однак на практиці така оцінка не становить великого інтересу.

Поставимо завдання іншим чином. Потрібно визначити таку кількість дослідів  $n$ , щоб оцінка  $\hat{R}$  величини  $R$  відрізнялася від  $R$  не більше ніж на деяку величину  $\beta$  з довірчим коефіцієнтом  $\alpha$ . Маючи на увазі, що функція

$$\chi = th(y)$$

монотонна та зворотна функція визначається формулою

$$y = \frac{1}{2} \ln \frac{1+\chi}{1-\chi}.$$

Перетворимо (17) до виду:

$$\frac{1}{2} \ln \frac{1+\hat{R}}{1-\hat{R}} - \frac{\varepsilon_\alpha}{\sqrt{n-3}} < \frac{1}{2} \ln \frac{1+R}{1-R} < \frac{1}{2} \ln \frac{1+\hat{R}}{1-\hat{R}} + \frac{\varepsilon_\alpha}{\sqrt{n-3}}.$$

Далі неважко показати, що кількість дослідів  $n$  може бути приблизно обчислена за формулою

$$n \approx \frac{2\varepsilon_\alpha}{\ln^2 \left[ \frac{(1+\hat{R})(1-R)}{(1-\hat{R})(1+R)} \right]}.$$

Вводячи в розгляд  $\beta$ , отримаємо

$$n \approx \frac{2\varepsilon_\alpha}{\ln^2 \left[ \frac{(1+\hat{R})(1-\hat{R}+\beta)}{(1-\hat{R})(1+\hat{R}-\beta)} \right]} \quad (18)$$

Остання формула визначає якісно та кількісно постановку задачі (при  $\beta \rightarrow 0, n \rightarrow \infty$ ).

Таким чином, кількість дослідів  $n$  залежить від величини  $\hat{R}$ . Вочевидь, що така залежність небажана, оскільки  $\hat{R}$  заздалегідь невідомо, отже, число  $n$  має постійно уточнюватися під час експерименту.

Оцінимо кількість дослідів, користуючись такими міркуваннями. Визначатимемо  $n$  з тієї умови, що величина  $\hat{R}$  є «невигідною» (маючи на увазі число дослідів). Очевидно, що такою є  $\hat{R} = 0$ . Це неважко перевірити, користуючись співвідношенням (18) і досліджуючи його на екстремум. Тобто найневигіднішим є білий шум.

Задаючись довірчим коефіцієнтом  $\alpha = 0,95$ , що відповідає  $\varepsilon_\alpha = 1,95$  величиною  $\beta = 0,05$  та підставляючи чисельні значення  $\beta$  і  $\varepsilon_\alpha$  в (18) отримаємо

$$n \approx \frac{2(1,95)^2}{\ln^2 \left( \frac{1+0,05}{1-0,05} \right)} \approx 8 \cdot 10^2.$$

Однак, з фізичних міркувань ясно, що випадок  $\hat{R} = 0$  є малоімовірним, а дійсна величина  $\hat{R}$  коливатиметься в межах  $(0,75 \div 1)$  внаслідок малості інтервалу  $\delta$ . Таким чином, вибираючи в якості вихідного  $\hat{R} = 0,75$  отримаємо

$$n \approx \frac{2(1,95)^2}{\ln^2 \left( \frac{1,75 \cdot 0,3}{0,25 \cdot 1,7} \right)} \approx 2 \cdot 10^2.$$

Неважко довести, що кількість дослідів  $n$  для визначення дисперсії досліджуваного випадкового процесу буде меншою при тому ж довірчому коефіцієнті і точності, ніж у разі визначення величини  $R$ . Отже, найбільш раціональним методом обробки експериментальних даних буде метод спільного визначення оцінок для  $\hat{R}$  і  $\sigma^2$ , причому визначення числа  $n$  має вестися за величиною  $\hat{R}$ .

Виділення тренду досліджуваного випадкового процесу можна здійснити скористатися рекомендаціями [8].

**Висновок.** Цифрова обробка інформації про електроспоживання можлива при перетворенні досліджуваного процесу в дискретну форму. Правильний вибір інтервалу контролю дозволяє з достатньою мірою точності відновити значення досліджуваної функції в інтервалах між вимірами. Запропонована процедура вибору інтервалу контролю електричної потужності, яка заснована визначенні тривалості викиду випадкової функції зміни електричної потужності за деяке введене обмеження. Обґрунтована кількість дослідів контролю для визначення оптимального інтервалу контролю електричної потужності.

**Список використаної літератури**

1. Калинчик В.П. Определение шага дискретизации для контроля и управления электропотреблением// Калинчик В.П., Петров А.А., Калинчик В.В./ Промелектро - № 3- 2010 – С. 43–50.
2. Калинчик В.П. К определению осредненной электрической мощности // Калинчик В.П., Петров А.А., Калинчик В.В. / НТУУ «КПИ» Н.-и. Ин-т автоматизации и энергетики „Енергія” – Киев, 2010. – 7 с.: ил.: – Рус. – Деп. в ГНТБ Украины 01.11.10, № 127-Ук – 2010
3. А.В. Волошко. До визначення усередненої електричної потужності// А.В. Волошко, В.П. Калинчик/ Енергетика: економіка, технології, екологія – 2017. - № 1. – С. 14-18.
4. В.П. Калинчик. Определение интервала дискретизации при исследовании режимов электропотребления объектов дробильно-помольного комплекса // В.П. Калинчик, А.В. Мейта / Енергетика: економіка, технології, екологія – 2015. - № 2. – С. 38-42.
5. Огірко О. І. Теорія ймовірностей та математична статистика: навчальний посібник / О. І. Огірко, Н. В. Галайко. – Львів: ЛьвДУВС, 2017. – 292 с.
6. Fisher R.A. The design of experiments// Fisher R.A./ – COLLIER MACMILLAN PUBLISHERS. London. – 1974. – 256 p.
7. David F.N. A note on abissed limits for correlation coefficient /David F.N. – Biometric, v. 29, 157-160.
8. Anderson T.W. An introduction to multivariate statistical analysis/ Anderson T.W. –John Wiley, 2003.–747p.

**V.P. Kalinchyk**<sup>1</sup>, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, ORCID 0000-0003-4028-0185

**O. Meita**<sup>1</sup>, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, ORCID 0000-0002-4132-5202

**V.V. Kalinchyk**<sup>1</sup>, Cand. Sc. (Eng.), ORCID 0000-0003-3931-646X

**V. Pobigaylo**<sup>1</sup>, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, ORCID 0000-0003-2673-7329

**O. Borychenko**<sup>1</sup>, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, ORCID 0000-0002-6127-2945

<sup>1</sup>**National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»**

**STATISTICAL ESTIMATES OF VARIABLES DETERMINING THE INTERVAL OF ELECTRIC POWER MONITORING**

*It is demonstrated that digital processing of information on electricity consumption is possible when transforming the studied process into a discrete form. The correct choice of the monitoring interval allows for the accurate reconstruction of the values of the studied function in the intervals between measurements. It is shown that when organizing the monitoring of average power, it is necessary to select a discretization interval that provides adequate representation of the current process. The proposed procedure for choosing the interval of electric power monitoring is based on determining the duration of the deviation of the random function of electric power change, subject to certain constraints. The justified number of monitoring studies is established to determine the optimal interval of electric power monitoring. It is shown that the most rational method of processing experimental data will be the method of joint estimation for correlation and standard deviation.*

**Keywords:** *electricity consumption, power, discretization, monitoring.*

**References**

1. Kalinchyk V.P. Determination of discretization step for monitoring and control of electricity consumption // Kalinchyk V.P., Petrov A.A., Kalinchyk V.V. / Promelectro - No. 3- 2010 – P. 43–50.
2. Kalinchyk V.P. On the determination of averaged electrical power // Kalinchyk V.P., Petrov A.A., Kalinchyk V.V. / NTUU "KPI" N.-i. Institute of Automation and Energy "Energiya" – Kyiv, 2010. – 7 p.: ill.: – Rus. – Deposited in the State Scientific and Technical Library of Ukraine on 01.11.10, No. 127-Uk – 2010
3. A.V. Voloshko. On the determination of averaged electrical power // A.V. Voloshko, V.P. Kalinchik / Energy: Economics, Technologies, Ecology – 2017. - No. 1. – P. 14-18.
4. V.P. Kalinchyk. Determination of the discretization interval in the study of electricity consumption modes of crushing and grinding complex objects // V.P. Kalinchyk, A.V. Meita / Energy: Economics, Technologies, Ecology – 2015. - No. 2. – P. 38-42
5. Ohirko O.I. Probability theory and mathematical statistics: a textbook / O. I. Ohirko, N. V. Halayko. – Lviv: LvDUS, 2017. – 292 p.
6. Fisher R.A. The design of experiments// Fisher R.A./ – COLLIER MACMILLAN PUBLISHERS. London. – 1974. – 256 p.
7. David F.N. A note on abissed limits for correlation coefficient /David F.N. – Biometric, v. 29, 157-160.
8. Anderson T.W. An introduction to multivariate statistical analysis/ Anderson T.W. – John Wiley, 2003.

Надійшла: 31.01.2024

Received: 31.01.2024

Г.С. Белоха<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0003-4277-367X  
Р. Стржелецьки<sup>2</sup>, доктор техн. наук, проф. ORCID 0000-0001-9437-9450  
Д.Г. Дерев'янка<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0002-4877-5601  
І.П. Радиш<sup>3</sup>, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0003-0187-4183

<sup>1</sup>Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

<sup>2</sup>Гданський Політехнічний Університет

<sup>3</sup>Ужгородський національний університет

## АНАЛІЗ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОЦЕСІВ ЗАРЯДУ ЕЛЕКТРОМОБІЛЕЙ В ТРАНЗАКТИВНИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМАХ

*Впровадження розумної зарядки електромобілів дозволяє операторам локальних електромереж і постачальникам електроенергії впроваджувати нові бізнес-моделі взаємодії електромобілів з мережею. Крім оптимального відбору потужностей Microgrid при заряді електромобілів, важливо і використання різних методів заряду. Для задоволення інтересів всіх учасників локальних систем з економічної та технічної точки зору обрано концепцію транзактивної енергії. Проведено дослідження впливу різних методів керування зарядом на ККД батареї EV, таких як двоетапне заряджання (CC-CV), прискорену зарядку (BC) та альтернативну багаторівневу зарядку MSCC. Оптимізація процесів заряду має на меті не тільки збільшення прибутку від продажу електроенергії, а також мінімізація витрат на зарядку за допомогою оптимального потоку електроенергії від мережі до автомобіля. Запропонована цільова функція залежить від потужності генерації усіх джерел які входять до системи, стану заряду систем зберігання, часу добу, часу заряджання електромобілів, швидкості заряджання, ціни на електроенергію. Система керування, вирішуючи цільову функцію, сама обирає та пропонує споживачу та агрегатору метод заряджання, який для даних параметрів системи буде оптимальним для усіх учасників транзактивної системи. Цифровим моделюванням досліджено три методи заряд, для чотирьох різних типів електромобілів, всі розглянуті методи заряду високі показники енергоефективності які можливо використовувати, як методи керування при заряді електромобілів від локальних систем.*

**Ключові слова:** Microgrid, електромобіль, заряд електромобіля, транзактивна система, розумна зарядка, локальні системи.

### Вступ.

За останні роки кількість електромобілів значно зросла. Однак широке розповсюдження електромобілів створює декілька проблем, зокрема щодо зарядної інфраструктури та впливу на електричну мережу. Особливо негативний вплив відчутно в локальних електроенергетичних системах. Реалізація швидкої та ефективної зарядки, є важливим, але складним питанням у перетворенні енергії та керуванні зарядом електромобілів. Добре розроблена стратегія заряду може захистити батареї від перегріву, продовжити термін служби батареї і підвищити ефективність перетворення енергії. Крім того, економічні втрати під час експлуатації електромобілів можна зменшити за допомогою відповідних протоколів зарядки акумуляторів та системи енергоменеджменту Microgrid [1-4]. Вплив впровадження електромобілів в локальні енергетичні системи представлено на рис. 1 [4]. Для вирішення проблем зв'язаних з негативним впливом, з'явилися підходи до розумної зарядки які оптимізують процеси заряджання та сприяють підвищенню надійності та ефективності мережі.

Для задоволення інтересів всіх учасників локальних систем з економічної та технічної точки зору доречно використовувати концепцію транзактивної енергії та транзактивних енергетичних систем. Такі системи об'єднують декілька Microgrid. У транзактивній системі керування енергією відбувається через взаємодію генераторів електричної енергії та об'єктів споживання безпосередньо або через агрегаторів через економічні сигнали.

Основні характеристики транзактивних енергетичних систем

- децентралізованість, можливість роботи без централізованої мережі
- автономність, в структурі транзактивної системи джерелами генерації керують їхні власники; але механізми транзакцій призначені для узгодження їх з потребами електромережі, при цьому усі учасники транзактивної системи виробляють, купують та продають електроенергію, оптимізуючи свої власні цілі.
- висока ступінь автоматизації, наявність програмного забезпечення, інформаційний та фізичний зв'язок усіх учасників транзактивних систем.

Впровадження розумної зарядки для електромобілів дозволяє операторам електромереж і постачальникам електроенергії впроваджувати нові бізнес-моделі взаємодії електромобілів з мережею.

Збираючи детальні дані про методи заряджання електромобілів і споживання енергії, постачальники послуг можуть пропонувати додаткові послуги, такі як оптимізовані плани заряджання, методів заряду та застосування програм реагування на попит. Крім того, інтеграція електромобілів в локальні електроенергетичні системи дозволяє використовувати технологію «автомобіль-мережа», де електромобілі можуть надавати допоміжні послуги мережі, такі як регулювання частоти та зберігання енергії [5-8].

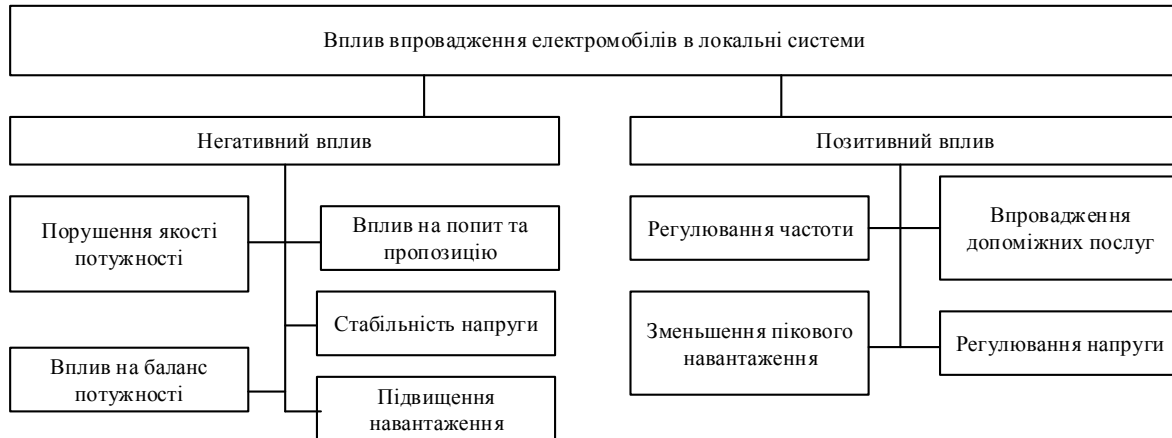


Рисунок 1 - Вплив впровадження електромобілів

Цілі методів заряджання зосереджені навколо скорочення часу заряджання, плавне підвищення температури під час заряджання, підвищення ефективності заряджання та подовження загального терміну служби акумулятора.

Оскільки процес заряджання акумулятора є нелінійним, застосовуються різні методи для ефективного контролю заряду акумулятора.

*Традиційні методи керування*, які зазвичай використовуються для заряджання акумулятора: постійний струм (CC), постійна напруга (CV), двоетапне заряджання (CC-CV), імпульсне заряджання (PC), рефлекторне заряджання або негативне імпульсне заряджання (NPC), та плаваючий заряд (FC) [9-11] (рис.2).

- *Заряд постійним струмом (CC)*. Цей метод полягає в заряджанні акумулятора постійним струмом, при цьому значення напруги залежить від струму заряджання (рис. 2 а). Недоліком цього методу є неконтрольована напруга, яка може спричинити перезаряд акумулятора, перенапруги та перегрів, що призведе до зменшення терміну служби акумулятора.

- *Заряд постійною напругою (CV)*. На початковому етапі зарядки струм заряду високий. В процесі заряду зарядний струм зменшується. Цей метод використовується в програмах, коли необхідні тривалі періоди заряджання для досягнення необхідного заряду. Оскільки для цього потрібен тривалий час заряджання, це спричинить підвищення температури та погіршення терміну служби батареї (рис 2 б).

- *Плаваючий заряд (FC)*: цей метод передбачає заряд CV після завершення процесу заряджання, під час якого ємність батареї підтримується на максимальному рівні. Цей метод використовується для стаціонарних акумуляторів, переважно свинцевих, та не підходить для заряду електромобілів.

- *Постійний струм – постійна напруга (CC-CV)* це двоетапний метод, він поєднує в собі як CC, так і CV методи. CC застосовується на початковій стадії зарядки, доки напруга батареї не досягне попередньо визначеної напруги. На другому етапі метод заряджання перемикається на CV для підтримки напруги батареї, таким чином він уникає перенапруги. Дослідження показують, що метод зарядки CC-CV є найефективнішим для заряджання акумулятора незалежно від його типу. Крім того, це найбільш використовуваний метод керування зарядом. Однак швидкість заряджання і ефективність стратегії заряджання CC-CV низькі, а також він не підходить для швидкої зарядки, оскільки етап зарядки CV подовжує час зарядки, підвищує температуру батареї та скорочує її життєвий цикл (рис. 2.в).

- *Прискорена зарядка (BC)* є одним із методів збільшення швидкості зарядки порівняно з методом CC-CV. BC — це варіант заряджання CC-CV, який включає більш високий CC або період постійної потужності (CP) на початку періоду заряджання. (рис. 2 г.)

- *Постійна потужність — постійна напруга (CP-CV)* подібна до CC-CV, за винятком того, що постійна потужність використовується замість постійного струму для заряджання до певної межі напруги перед переходом на постійну напругу (рис. 2 д). Цей спосіб заряджання зменшує зарядний струм батареї, поки він не досягне заданого порогу. На початковій ділянці зарядки потрібен великий струм, щоб підтримувати контрольовану напругу. Однак така швидка швидкість заряджання підвищує температуру батареї, що призводить до збільшення втрат тепла. Основним завданням цієї техніки заряджання є пошук

оптимального значення постійної напруги, щоб збалансувати швидкість заряджання, використання ємності акумулятора та розпад електроліту.

- *Імпульсне заряджання (PC)*: цей метод заряду полягає в періодичній подачі імпульсного струму до батареї. Батареї розряджаються та періодично перезаряджаються під час так званого вирівнюючого заряду. Це дозволить напрузі акумулятора стати більш стабільним. У цьому методі заряджання важливо брати до уваги частоту заряджання, пік імпульсу та ширину імпульсу, оскільки вони пов'язані з ємністю та часом заряджання. Цей метод може зменшити поляризацію, щоб запобігти підвищенню температури батареї, але є складність при реалізації (рис. 2 е).

- *Рефлекторна зарядка або негативна імпульсна зарядка (NPC)*: це вдосконалена імпульсна зарядка. Цей метод може зменшити поляризацію, щоб запобігти підвищенню температури батареї. Однак це також може знизити ефективність заряду (рис.2 ж).

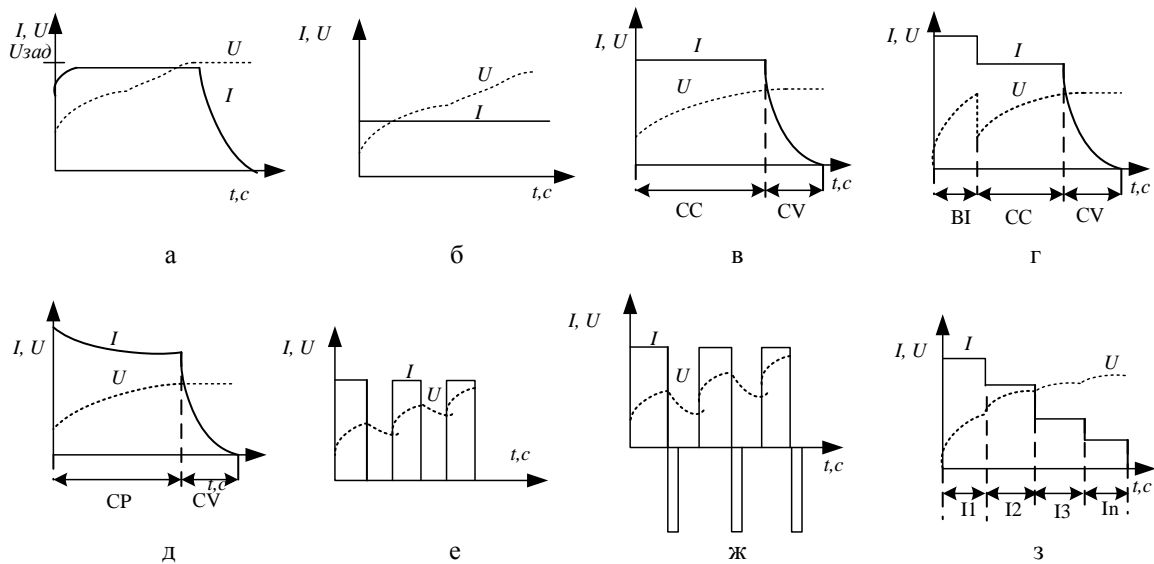


Рисунок 2 - Методи заряду: постійна напруга (а); постійний струм (б); метод СС-СМ (в); метод ВІ (г); метод СР-СВ (д); імпульсний (е); рефлекторний (ж); багаторівневий (з)

*Альтернативні методи.* Багаторівневі методи заряджання (MSCC) відносяться до альтернативних методів для отримання швидшої та безпечнішої зарядки та довшого циклу роботи батареї. Заряджання полягає в багаторівневому методі зарядки постійним струмом, у якому час заряджання ділиться на декілька етапів. На кожному етапі зарядний струм встановлюється на постійне порогове значення. Цей процес триватиме до тих пір, поки номер етапу не досягне максимально заданого (рис. 2 з). Для визначення зарядного струму та часу переключення на кожному етапі можна використовувати різні алгоритми.

Перехід від однієї стадії до наступної визначається здебільшого виконанням одного з наступних чотирьох критеріїв:

*Перехід на основі часу.* Час є одним з параметрів для переходу від одного етапу до наступного, як показано на рис.3 а. Переходи на основі часу легко реалізувати, але не існує стандартного методу для визначення того, коли етапи переходять від одного до наступного. Дослідження показали, що зарядка MSCC покращує термін служби та значно скорочує час зарядки порівняно з методом СС. Однак не має стандартною процедури пошуку оптимального часу перемикання етапів.

*Перехід на основі SOC.* Для переходу від однієї стадії до іншої різні дослідження пропонували певну кількість стадій SOC. Перехід на основі SOC використовувався для переходу від однієї стадії до іншої, як показано на рис. 3 б. Результати показали, що запропонована стратегія MSCC із переходом на основі SOC може зменшити час заряджання, підвищити ефективність заряджання, збільшити ємність заряду/розряду, зменшити підвищення температури, і збільшити термін служби порівняно зі стандартом метод (CC-CV). Але точна оцінка SOC є складною, тому застосувати перехід на основі SOC може бути складно при практичному використанні.

*Критерії на основі порогової напруги.* Перехід на основі порогової напруги є ще одним критерієм для проектування переходу зарядки між двома послідовними етапами. У цьому випадку для зміни вибирається інший поріг напруги ступінь і значення зарядного струму, як показано на рис. 3 в.

*Критерії на основі напруги відключення.* Критерії на основі напруги відключення є найбільш використовуваним критерієм у літературі для переходу від одного етапу до наступного (рис. 3 г). Виробник визначає значення напруги відключення.

Кожен спосіб заряджання має свої переваги та недоліки. Хоча зарядку CC-CV відносно просто реалізувати, але вона не підходить для швидкої зарядки. Методи заряджання PC та NPC зменшують час заряджання, але є дорогими та складними. Однак підхід до стягнення плати за MSCC простий у використанні. Обмеженням MSCC є необхідність точного прогнозування SOC або рівня напруги для їх використання.

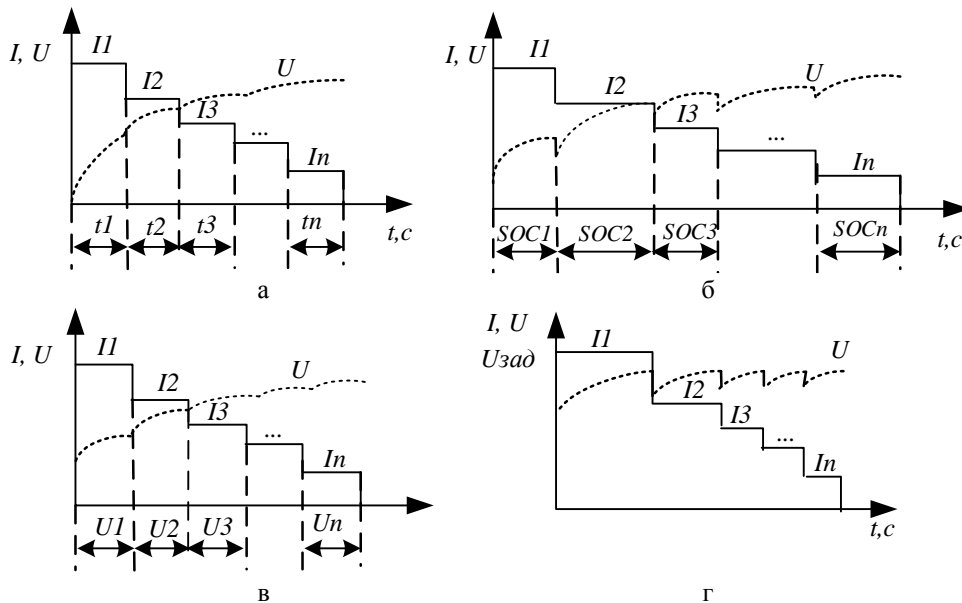


Рисунок 3 - Керування зарядом при переході з рівень на рівень на основі часу (а), SOC (б), порогової напруги (в), напруги відключення (г)

Процес зарядки літій-іонного акумулятора потрібно проводити обережно, оскільки спосіб зарядки сильно впливає на те, наскільки активно протікають електрохімічні реакції всередині батареї, а також впливають на термін служби самої батареї. З цієї причини пошук оптимальної методики зарядки батареї за найкоротший період часу з високою ефективністю є актуальною проблемою.

**Мета роботи** – дослідження впливу різних методів керування зарядом на ефективність батареї EV, виявлення кращих методів зарядження для використання їх при оптимізації транзактивних систем.

**Матеріал і результати досліджень**

Локальна енергетична система складається з джерел розосередженої генерації, систем зберігання енергії, та навантажень.

Оптимізація процесів заряду має на меті не тільки збільшення прибутку від продажу електроенергії, а також мінімізація витрат на зарядку за допомогою оптимального потоку електроенергії від мережі до автомобіля. Запропонована цільова функція ЦФ залежить від потужності генерації усіх джерел  $P_T$ , які входять до системи, потужностей споживачів  $P$ , стану заряду систем зберігання  $P_{C3}$ , часу заряджання електромобілів  $t_3$ , швидкості заряджання  $V_3$ , ціни на електроенергію  $C$  :

$$ЦФ = f(P_T, P, P_{C3}, t_3, V_3, C) \tag{1}$$

Для задоволення потреб заряджання електромобілів у різних ситуаціях було розроблено різноманітні режими заряджання відповідно до стандартів SAE J1772, IEC 61851-1 і GB/T 18487-1. Режим з параметрами 120В 16А є найпоширенішим режимом повільного заряджання змінним струмом, який можна зручно виконувати від домашньої розетки, і потрібен лише вбудований перетворювач живлення. У цьому випадку час зарядки зазвичай становить кілька годин. Режим постійного струму є перспективним рішенням, який може забезпечити потужністю 400 кВт з напругою від 250 до 400 В та зарядним струмом до 100 А. Крім того, Tesla пропонує свої характеристики режиму зарядки, з можливістю заряду постійним струмом на 1000 В [13].

Неконтрольоване керування, яке використовується в електромобілях, створює високі піки попиту на електроенергію, якщо розглядати класичні щоденні сценарії з поїздками з дому на роботу та з роботи додому. Електромобілі підключаються до електромережі в один і той же момент і очікують негайного початку заряджання, тоді як у більшості випадків заряджання транспортних засобів може бути відкладено. Використання цін на електроенергію для контролю зарядки електромобілів є можливим рішенням у стратегії керування зарядом.



Система керування сама обирає та пропонує споживачу та агрегатору метод заряджання, який буде для даних параметрів системи буде оптимальним для усіх учасників локальної системи. Наприклад, змінення швидкої зарядки на звичайну, або відкладення зарядки у часі знижує пікові навантаження на систему. Користувач і мережа живлення можуть безпосередньо отримати конкретні переваги, такі як дешевше заряджання.

Для аналізу продуктивності літій-іонних батарей використовують: час заряджання, ефективність заряджання та розряджання (коефіцієнт корисної дії), зарядна/розрядна ємність і підвищення температури під час заряджання.

Є три типи енергоефективності відповідно до різних умов роботи батареї: енергоефективність під час заряджання ( $\eta_{zap}$ ), енергоефективність під час розряду ( $\eta_{poz}$ ) та енергоефективність під час заряджання та розрядження ( $\eta$ ) [11].

Енергоефективність під час заряджання  $\eta_{zap}$  — це відношення хімічної енергії, отриманої батареєю під час заряджання, тобто чистої енергії ( $\Delta E_{battery}$ ), до енергії, отриманої від джерел живлення для зарядки батареї ( $\Delta E_{in}$ ).

$$\eta_{zap} = \frac{\Delta E_{battery}}{\Delta E_{in}} \quad (2)$$

$$\Delta E_{battery} = \int_{t_0}^t U_{OCV} I dt = \int_{SOC(0)}^{SOC(t)} U_{OCV} C_n dSOC \quad (3)$$

$$\Delta E_{in} = \int_{t_0}^t U_C I_C dt = \int_{SOC(0)}^{SOC(t)} U_C C_n dSOC \quad (4)$$

де  $U_C$  — напруга замкнутого ланцюга батареї (CC-CV) під час заряджання,  $I_C$  — зарядний струм,  $C_n$  — стандартна ємність батареї,  $SOC(0)$  — стан заряду батареї на момент початку заряджання, і  $SOC(t)$  — SOC, коли зарядка завершена.

Значення  $U_{OCV}$  при різних SOC отримують двома способами. Традиційний метод полягає у вимірюванні напруги на клеммах батареї після певного періоду часу заряджання/розряджання.

Енергоефективність при розрядці  $\eta_{poz}$  розраховується подібним чином, як відношення енергії, що розряджається від батареї, до корисної енергії батареї  $\Delta E_{battery}$ .

$$\eta_{poz} = \frac{\Delta E_{out}}{\Delta E_{battery}} \quad (5)$$

Значення  $\Delta E_{out}$  обчислюється за таким рівнянням:

$$\Delta E_{out} = \int_{t_0}^t U_d I_d dt = \int_{SOC(0)}^{SOC(t)} U_d C_n dSOC \quad (6)$$

де  $U_d$  — напруга батареї під час розряду, а  $I_d$  — розрядний струм.

Коефіцієнт корисної дії є одним із ключових показників ефективності процесу заряду. Він визначається як відношення розрядної ємності, отриманої від зарядженого EV, до зарядної ємності під час заряджання [9]:

$$\eta = \frac{I_d t_d}{\sum_{i=1}^n I_c t_c} \quad (7)$$

де  $t_d$  — час розряду,  $n$  — кількість ступенів,  $t_c$  — час заряду.

В програмі Matlab досліджено для локальної системи постійного струму досліджені різні етапи заряду, та оцінено їх ефективність. Використання різних стратегій керування дозволить оптимізувати локальну систему. У якості прикладу обрані 4 електромобіля [15,16].

Таблиця 1. Параметри електромобілів

Параметри	Nissan leaf (2013)	Kia Soul	Renault ZOE	Kia Niro
Ємність (кВт*год)	24	31,8	52	64,8
Номинальна напруга, В	330	360	350	348
Напруга відсічення розряду, В	336	336		
Макс. напруга зарядки, В	394	394		
Макс. струм, А	71	88	134	

Метод CC-CV не використовується для швидкої зарядки, оскільки високий зарядний струм необхідно тримати майже увесь час зарядження, що призведе до перегріву та скороченню терміну служби. Метод BC має короткочасну ділянку зі збільшеним струмом заряду, що пришвидшує заряд, при цьому не призводить до надмірного нагріву батареї. В цьому дослідженні використовувалось збільшення струму на 20% на першій ділянці. Також використовувався метод MSCC, на швидкість заряджання впливає декілька факторів, зокрема кількість ступенів, а також струм заряду першого й останнього етапів. Збільшення кількості ступенів покращує використання ємності та ефективність зарядки.

За виразами (2)-(7) та цифровим моделювання отримані значення ККД для представлених електромобілів при обраних методах заряджання (таблиця 2).

Таблиця 2. Результати досліджень

	$\eta$		
	CC-CV	BC	MSCC
<b>EV1</b>	0,961	0,962	0,98
<b>EV2</b>	0,948	0,951	0,978
<b>EV3</b>	0,952	0,96	0,976
<b>EV4</b>	0,956	0,963	0,982

**Висновки.** Важливо при заряді електромобілів використовувати оптимальні методи заряджання які не тільки сприятимуть скорочення часу заряджання, плавному підвищенню температури під час заряджання, підвищенню ефективності заряджання та подовженню загального терміну служби акумулятора. Але й вибір того чи іншого методу заряду сприятиме оптимальній роботі локальної мережі.

Проведено дослідження впливу різних методів керування зарядом на ККД батареї електромобіля, таких як двоетапне заряджання (CC-CV), прискорену заряду (BC) та альтернативну багаторівневу зарядку MSCC. Запропонована цільова функція залежить від потужності генерації усіх джерел які входять до системи, стану заряду систем зберігання, часу добу, часу заряджання електромобілів, швидкості заряджання, ціни на електроенергію. Система керування, вирішуючи цільову функцію, сама обирає та пропонує споживачу та агрегатору метод заряджання, який для даних параметрів системи буде оптимальним для усіх учасників транзактивної системи. Цифровим моделюванням проведено аналіз трьох методів заряду, всі мають високі показники енергоефективності які можливо використовувати, як методи керування при оптимізації процесів заряджання в транзактивних системах.

#### Список використаної літератури

1. Chen, Guan-Jhu, and Wei-Hsin Chung. 2023. "Evaluation of Charging Methods for Lithium-Ion Batteries" *Electronics* 12, no. 19: 4095. <https://doi.org/10.3390/electronics12194095>
2. H.S. Das, M.M. Rahman, S. Li, C.W. Tan, Electric vehicles standards, charging infrastructure, and impact on grid integration: A technological review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 120, 2020, 109618, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109618>.
3. Lavrenova Y.R., Denysiuk S.P. "Optimization of power dispatching schedule of a charging station based on a micro grid with a photovoltaic module". *Applied Aspects of Information Technology*. 2023; Vol. 6, No. 4: 391–403. DOI:<https://doi.org/10.15276/aait.06.2023.26>.
4. Muhammad Shahid Mastoi, Shenxian Zhuang, Hafiz Mudassir Munir, Malik Haris, Mannan Hassan, Muhammad Usman, Syed Sabir Hussain Bukhari, Jong-Suk Ro, An in-depth analysis of electric vehicle charging station infrastructure, policy implications, and future trends, *Energy Reports*, Volume 8, 2022, Pages 11504-11529, ISSN 2352-4847, <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.09.011>.
5. Nizam, M.; Maghfiroh, H.; Irfani, B.; Inayati, I.; Ma'arif, A. Designing and Prototyping of Lithium-Ion Charging System Using Multi-Step Constant Current Method. *World Electr. Veh. J.* 2022, 13, 178. <https://doi.org/10.3390/wevj13100178>
6. Zeng, L.; Chen, S.-Z.; Tang, Z.; Tian, L.; Xiong, T. An Electric Vehicle Charging Method Considering Multiple Power Exchange Modes' Coordination. *Sustainability* 2023, 15, 10520. <https://doi.org/10.3390/su151310520>
7. Limmer, Steffen. 2019. "Dynamic Pricing for Electric Vehicle Charging—A Literature Review" *Energies* 12, no. 18: 3574. <https://doi.org/10.3390/en12183574>
8. Brenna, M., Foiadelli, F., Leone, C. et al. Electric Vehicles Charging Technology Review and Optimal Size Estimation. *J. Electr. Eng. Technol.* 15, 2539–2552 (2020). <https://doi.org/10.1007/s42835-020-00547-x>
9. Tahir, M. U., Sangwongwanich, A., Stroe, D-I., & Blaabjerg, F. (2023). Overview of multi-stage charging strategies for Li-ion batteries. *Journal of Energy Chemistry*, 84, 228-241. Advance online publication. <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2023.05.023>
10. Banguero, Edison, Antonio Correcher, Ángel Pérez-Navarro, Francisco Morant, and Andrés

Ariztizabal. 2018. "A Review on Battery Charging and Discharging Control Strategies: Application to Renewable Energy Systems" *Energies* 11, no. 4: 1021. <https://doi.org/10.3390/en11041021>

11. K. Li and K. J. Tseng, "Energy efficiency of lithium-ion battery used as energy storage devices in microgrid," *IECON 2015 - 41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Yokohama, Japan, 2015, pp. 005235-005240, doi: 10.1109/IECON.2015.7392923

12. Ліпко Д. О., Бондаренко О. Ф. Використання часткового зарядно-розрядного циклу акумуляторної батареї для збільшення її ресурсу Технологія та конструювання в електронній апаратурі, 2023, № 3-4, с. 9-15.

13. M. S. Rahman, M. J. Hossain, F. H. M. Rafi and J. Lu, "EV charging in a commercial hybrid AC/DC microgrid: Configuration, control and impact analysis," 2016 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC), Brisbane, QLD, Australia, 2016, pp. 1-6, doi: 10.1109/AUPEC.2016.7749351

14. Lo Franco F, Ricco M, Mandrioli R, Grandi G. Electric Vehicle Aggregate Power Flow Prediction and Smart Charging System for Distributed Renewable Energy Self-Consumption Optimization. *Energies*. 2020; 13(19):5003. <https://doi.org/10.3390/en13195003>

15. <https://ev-database.org/>

16. K. Kouka, A. Masmoudi, A. Abdelkafi et al., Dynamic energy management of an electric vehicle charging station using photovoltaic power, *Sustainable Energy, Grids and Networks* (2020), doi: <https://doi.org/10.1016/j.segan.2020.100402>

**H. Bielokha**<sup>1</sup>, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, ORCID 0000-0003-4277-367X

**R. Strezhelsky**<sup>2</sup>, Dr. Sc. (Eng.), Prof., ORCID 0000-0001-9437-9450

**D. Derevinko**<sup>1</sup>, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, ORCID 0000-0002-4877-5601

**I. Radysh**<sup>3</sup>, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, ORCID 0000-0003-0187-4183

<sup>1</sup>National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

<sup>2</sup>Gdansk University of Technology

<sup>3</sup>Uzhhorod National University

## **ANALYSIS AND OPTIMIZATION OF ELECTRIC VEHICLE CHARGING PROCESSES IN TRANSACTIVE ENERGY SYSTEMS**

*The implementation of smart charging of electric vehicles allows operators of local power networks and electricity suppliers to implement new business models for the interaction of electric vehicles with the network. In addition to the optimal selection of Microgrid capacities when charging electric vehicles, it is also important to use different charging methods. To satisfy the interests of all participants of local systems from an economic and technical point of view, the concept of transactional energy was chosen. The effect of different charge management methods on EV battery efficiency, such as two-stage charging (CC-CV), accelerated charging (AC) and alternative multi-level MSCC charging, has been investigated. The optimization of charging processes aims not only to increase the profit from the sale of electricity, but also to minimize charging costs by means of an optimal flow of electricity from the network to the car. The proposed objective function depends on the generation capacity of all sources included in the system, the state of charge of the storage systems, the time of day, the charging time of electric vehicles, the charging speed, and the price of electricity. The control system, solving the objective function, itself chooses and offers the consumer and the aggregator a charging method that, given the system parameters, will be optimal for all participants of the transactional system. Three charge methods were investigated by digital simulation for four different types of electric vehicles, all considered charge methods have high energy efficiency indicators that can be used as control methods for charging electric vehicles from local systems.*

**Keywords:** *Microgrid, electric vehicle, electric vehicle charging, transactive system, smart charging, local systems.*

### **References**

1. Chen, Guan-Jhu, and Wei-Hsin Chung. 2023. "Evaluation of Charging Methods for Lithium-Ion Batteries" *Electronics* 12, no. 19: 4095. <https://doi.org/10.3390/electronics12194095>

2. H.S. Das, M.M. Rahman, S. Li, C.W. Tan, Electric vehicles standards, charging infrastructure, and impact on grid integration: A technological review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 120, 2020, 109618, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109618>.

3. Lavrenova Y.R., Denysiuk S.P. "Optimization of power dispatching schedule of a charging station based on a micro grid with a photovoltaic module". *Applied Aspects of Information Technology*. 2023; Vol. 6, No. 4: 391–403. DOI:<https://doi.org/10.15276/aait.06.2023.26>.

4. Muhammad Shahid Mastoi, Shenxian Zhuang, Hafiz Mudassir Munir, Malik Haris, Mannan Hassan, Muhammad Usman, Syed Sabir Hussain Bukhari, Jong-Suk Ro, An in-depth analysis of electric vehicle charging

station infrastructure, policy implications, and future trends, Energy Reports, Volume 8, 2022, Pages 11504-11529, ISSN 2352-4847, <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.09.011>.

5. Nizam, M.; Maghfiroh, H.; Irfani, B.; Inayati, I.; Ma'arif, A. Designing and Prototyping of Lithium-Ion Charging System Using Multi-Step Constant Current Method. World Electr. Veh. J. 2022, 13, 178. <https://doi.org/10.3390/wevj13100178>

6. Zeng, L.; Chen, S.-Z.; Tang, Z.; Tian, L.; Xiong, T. An Electric Vehicle Charging Method Considering Multiple Power Exchange Modes' Coordination. Sustainability 2023, 15, 10520. <https://doi.org/10.3390/su151310520>

7. Limmer, Steffen. 2019. "Dynamic Pricing for Electric Vehicle Charging—A Literature Review" Energies 12, no. 18: 3574. <https://doi.org/10.3390/en12183574>

8. Brenna, M., Foadelli, F., Leone, C. et al. Electric Vehicles Charging Technology Review and Optimal Size Estimation. J. Electr. Eng. Technol. 15, 2539–2552 (2020). <https://doi.org/10.1007/s42835-020-00547-x>

9. Tahir, M. U., Sangwongwanich, A., Stroe, D-I., & Blaabjerg, F. (2023). Overview of multi-stage charging strategies for Li-ion batteries. Journal of Energy Chemistry, 84, 228-241. Advance online publication. <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2023.05.023>

10. Banguero, Edison, Antonio Correcher, Ángel Pérez-Navarro, Francisco Morant, and Andrés Aristizabal. 2018. "A Review on Battery Charging and Discharging Control Strategies: Application to Renewable Energy Systems" Energies 11, no. 4: 1021. <https://doi.org/10.3390/en11041021>

11. K. Li and K. J. Tseng, "Energy efficiency of lithium-ion battery used as energy storage devices in micro-grid," IECON 2015 - 41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Yokohama, Japan, 2015, pp. 005235-005240, doi: 10.1109/IECON.2015.7392923

12. Lipko D. O., Bondarenko O. F. Vykorystannia chastkovoho zariadno-rozriadnoho tsykladu akumulatornoj batarei dlia zbilshennia yii resursu [Use of a partial charge-discharge cycle of the battery to increase its resource] Tekhnolohiia ta konstruiuvannia v elektronni aparaturi, 2023, № 3-4, s. 9-15.

13. M. S. Rahman, M. J. Hossain, F. H. M. Rafi and J. Lu, "EV charging in a commercial hybrid AC/DC microgrid: Configuration, control and impact analysis," 2016 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC), Brisbane, QLD, Australia, 2016, pp. 1-6, doi: 10.1109/AUPEC.2016.7749351

14. Lo Franco F, Ricco M, Mandrioli R, Grandi G. Electric Vehicle Aggregate Power Flow Prediction and Smart Charging System for Distributed Renewable Energy Self-Consumption Optimization. Energies. 2020; 13(19):5003. <https://doi.org/10.3390/en13195003>

15. <https://ev-database.org/>

16. K. Kouka, A. Masmoudi, A. Abdelkafi et al., Dynamic energy management of an electric vehicle charging station using photovoltaic power, Sustainable Energy, Grids and Networks (2020), doi: <https://doi.org/10.1016/j.segan.2020.100402>

Надійшла: 29.04.2024

Received: 29.04.2024

## ЩОДО УЛАШТУВАННЯ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ БУДІВЕЛЬ З ВІДНОВЛЮВАЛЬНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ЕНЕРГІЇ

Будівлі наразі є одним з потужніших споживачів енергетичних ресурсів в Україні, у тому числі електричної енергії[1] – на їх долю припадає біля 40% споживаної енергії. В Україні вимоги до рівня споживання енергії в будівлях регламентуються Законом «Про енергетичну ефективність будівель» через відповідні класи енергоефективності[2]. Питання підвищення енергоефективності даних об'єктів є глобальним завданням сьогодення на світовому рівні. Зокрема, на саміті ООН з клімату 2019 р поставлено за мету до 2030 року досягти виконання вимог нульового споживання енергії у нових забудовах та до 2050 року - такого ж рівня в існуючих будівлях. Використання відновлювальних джерел енергії є безумовною, необхідною складовою для вирішення поставлених завдань. Огляд літератури стосовно улаштування енергоефективних будівель в частині проєктування інженерних систем виявив низький рівень висвітлення питань, що стосуються улаштування та проєктування схем електропостачання будівель з ВДЕ[3-7]. В статті представлені існуючі схемні рішення інтеграції ВДЕ в систему електропостачання будівель.

**Метою даної статті** є опрацювати вітчизняний та закордонний досвід улаштування систем електропостачання будівель з ВДЕ, існуючі нормативні документи щодо цього, сформулювати вимоги, критерії вибору елементів, схемних рішень, та системи електропостачання з ВДЕ цілому.

**Ключові слова:** система електропостачання будівель, відновлювальні джерела енергії (ВДЕ), сонячна генерація електричної енергії, фотовольтаїчні електричні станції (ФЕС), фотоелектрична панель (ФП), сонячна батарея (СБ), інвертор, акумулятор, ввідний щиток, розподільчий щиток, з'єднувальна коробка, запобіжник, автоматичний вимикач, пристрій захисту від імпульсних перенапруг, заземлення.

### Вступ.

В основу подальшого розвитку енергетики України покладено повсюдне використання відновлювальних джерел енергії (ВДЕ), що закріплено в Енергетичній стратегії України на 2050 рік в частині досягнення максимального рівня кліматичної нейтральності, оновлення та модернізація енергетичної інфраструктури, розвиток альтернативних джерел енергії, нових продуктів та інноваційних рішень в енергетичному секторі [8].

Даний аспект є обумовленим з огляду на:

- розвиток країни у контексті світових трендів стратегії сталого розвитку;
- позитивний світовий досвід (США, Європа, Китай та ін.);
- обмеженість та скінченність власних викопних палив;
- відсутність (на даний момент) альтернативних екологічних, доступних джерел енергії, що дійшли до стадії широкого практичного застосування;
- необхідність енергетичної незалежності як складової незалежності країни в цілому.

Держава веде активну популяризацію та створює стимули для заохочення споживачів усіх форм власності щодо побудови установок, які виробляють енергію з використанням ВДЕ:

- зелений тариф;
- зелені єврооблігації;
- Міністерство енергетики України почало розглядати можливість та навіть готувати відповідну законодавчу базу щодо впровадження різних ринкових механізмів стимулювання розвитку ВДЕ, як наприклад, контракти на різницю (Contract for difference), корпоративні РРА, гарантії походження тощо[9];
- впровадження Системи керування обмеженнями ВДЕ, в якій прописано право виробникам на компенсацію за невідпущену в результаті диспетчерського обмеження електроенергію з ВДЕ
- підтримка закордонних грантових програм [10];
- формування та організація легкого доступу до інформаційних матеріалів [11].

Наслідками такої політики стало впевнена інтеграція генеруючих енергетичних установок в енергетичну систему України з стабільним збільшенням їх кількості рис. 1

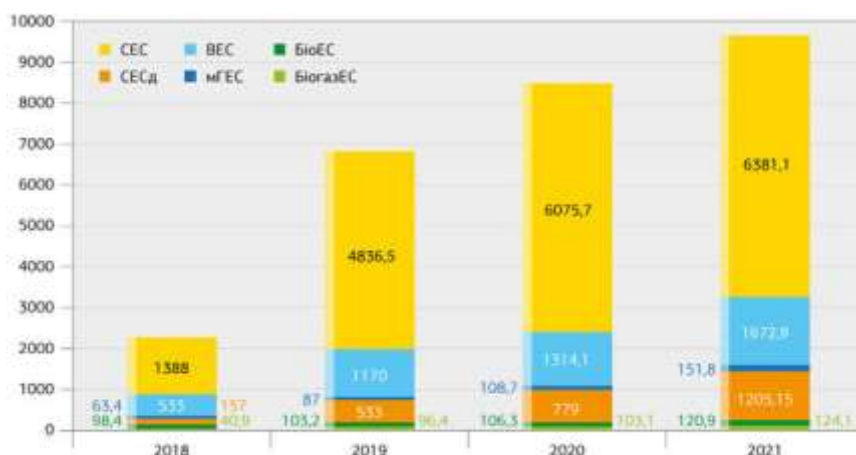


Рисунок 1 - Динаміка збільшення встановленої потужності об'єктів ВДЕ в Україні

Особливого розвитку набули Сонячні електричні станції, зокрема встановлені в домогосподарствах України - на кінець 2021 року встановлена потужність складала 1 205,1 МВт.

Таким чином, треба розуміти, що частка відновлювальної енергетики буде стабільно зростати, зокрема на об'єктах побуту. За якийсь час кожна будівля буде таким чи інакшим способом заживлена від ВДЕ. Постає проблема відсутності типових рішень, затверджених норм, вимог, критеріїв для улаштування систем електропостачання будівель з ВДЕ, зокрема з сонячною генерацією, відсутність нормативних документів, що регламентують ці питання. Питання розробки та проектування схем електропостачання таких об'єктів практично не розглядається.

### Схемні рішення системи електропостачання будівлі з сонячною генерацією

Інтеграція ВДЕ в систему електропостачання будівель має свої особливості в силу стохастичності генерації електричної енергії на таких джерелах, способу улаштування пристроїв генерації, геометричних характеристик будівлі за місцем улаштування, характер споживачів будівлі. Отже, необхідна варіація схемних рішень, які будуть оптимальним чином задовільняти заданим вхідним техніко-економічним параметрам будівлі, характеру та потребам кінцевого споживача.

На рис. 2 наведено варіант схемного рішення системи електропостачання будівлі (СЕПБ), що може бути застосована в будівлі, де пристрої сонячної генерації розташовані за різними сторонами світу. Оптимальні параметри генерації електричної енергії в цій схемі досягаються завдяки використанню оптимізаторів потужності – пристрою, який підключається до кожного фотоелектричного модулю та усуває вплив окремих модулів, які в певний час можуть знаходитись в гірших умовах продуктивності (кут нахилу, азимут тощо) на інші фотоелектричні модулі системи, тим самим дозволяє раціонально використовувати наявні площини дахів будівель.

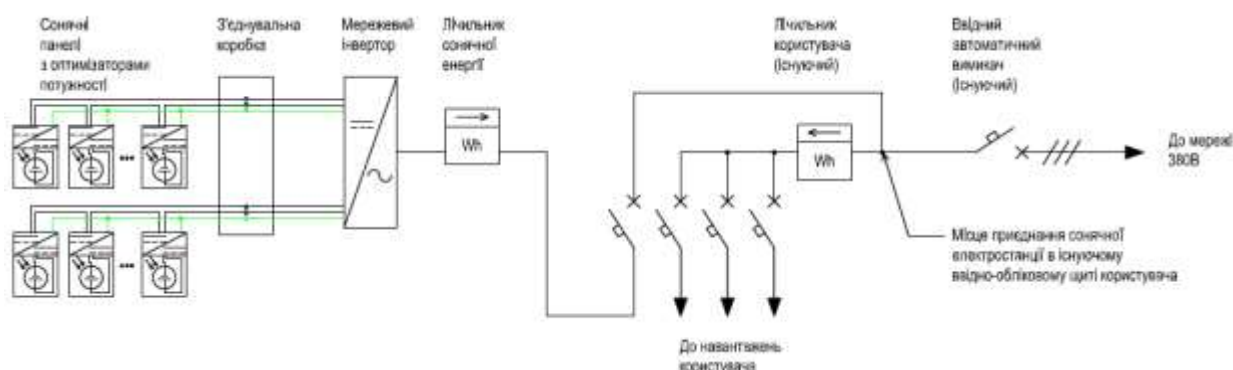


Рисунок 2 – Система електропостачання будівлі з мережевим інвертором та оптимізаторами потужності

Фотоелектрична зборка підключена до СЕПБ між ввідним автоматом будівлі та лічильником комерційного обліку електричної енергії. Таке технічне рішення дозволяє не проводити заміну існуючого

однонаправленого лічильника, але потребує улаштування додаткового, який здійснює облік сонячної генерації, для коретного розрахунку обсягів спожитої електричної енергії з централізованої мережі.

Захист кіл постійного струму (DC) здійснюється комутаційними приладами, що є вбудованими в інвертор, кіл змінного струму (AC) – автоматичними вимикачами. З'єднувальна коробка (junction box) призначена для з'єднання дротів.



Рисунок 3 – Загальний вигляд з'єднувальної коробки (junction box)

Схема, наведена на рис. 4, облаштована мікроінверторами. Таке рішення має наступні переваги: підвищення ефективності генерації електроенергії на 3-12% за рахунок роботи кожної сонячної панелі в режимі MPPT без оптимізатора потужності, висока надійність системи, гнучке нарощування потужності системи шляхом додавання мікроінверторів з сонячними панелями та підключення їх в мережу змінного струму, зменшення ділянок, що працюють на DC. В даній схемі приведено приклад підключення сонячної електростанції із заміною існуючого лічильника комерційного обліку на двонаправлений.

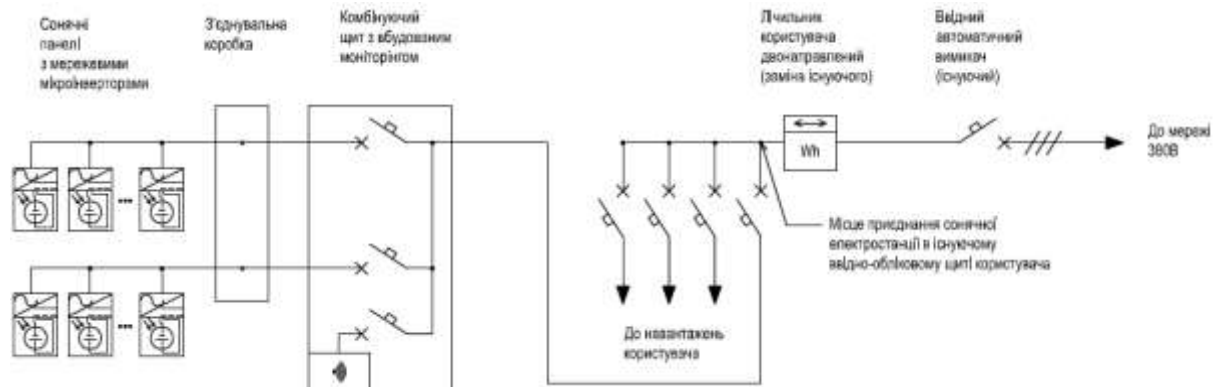


Рисунок 4 - Система електропостачання будівлі з мікроінверторами

Використання мікроінверторів потребує улаштування комбінованого щита (Combiner Box) (рис. 5) для можливості комутації та захисту окремих стрінгів сонячної системи. На схемі представлений комплектний щит з можливістю моніторингу сонячної генерації, на прикладі IQ Combiner 5/5C Quick.

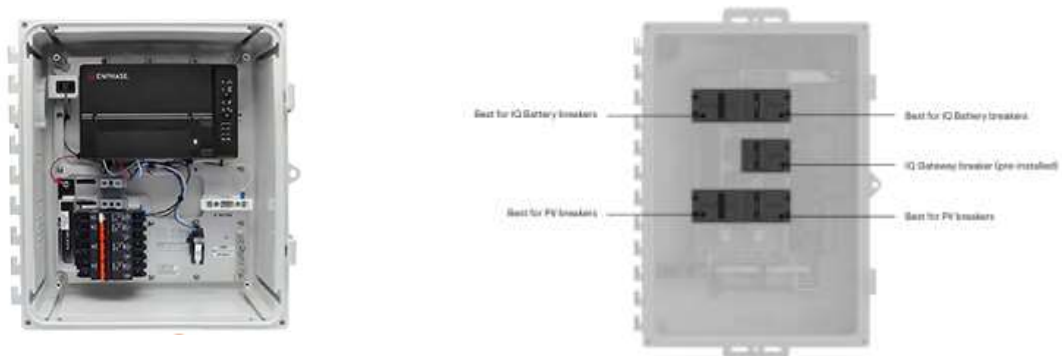


Рисунок 5 – Загальний вигляд комбінованого щита (Combiner Box) з можливістю моніторинга

На рис. 6 представлена схема системи електропостачання будівлі, що облаштована мікроінверторами на 2 фотоелектричних модуля. Комбінований щит (Combiner Box) є збірним. У порівнянні з попереднім варіантом дана схема є більш бюджетною в комплектуванні.

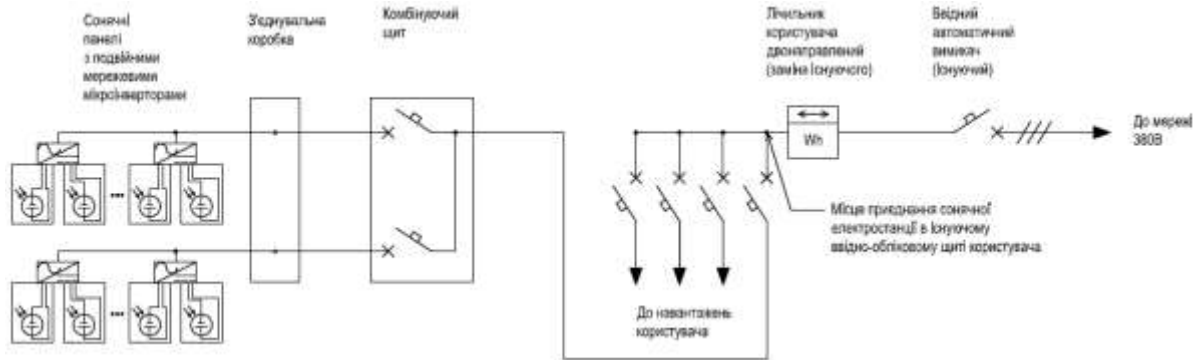


Рисунок 6 - Система електропостачання будівлі зі здовсними мікроінверторами та збірним комбінованим щитом

Основним недоліком схем рис. 2, рис. 4, рис. 6 є втрата живлення кінцевих споживачів за відсутності живлення в централізованій мережі.

За необхідності наявності додаткового джерела живлення – акумуляторна батарея – в СЕПБ може бути прийнята до улаштування схема рис. 7. В даному випадку є можливість виділити з усього переліку приймачів електричної енергії тих, що потребують резервування, улаштувати окремий розподільний щит для їх захисту та комутації, та заживити від сонячної генерації та акумуляторної батареї у разі втрати живлення від основного джерела. Усі зборки змінного струму заживлюються через інвертор. У разі від'єднання централізованої мережі мережевий вхід інвертора втрачає живлення, резервний вихід продовжує працювати.

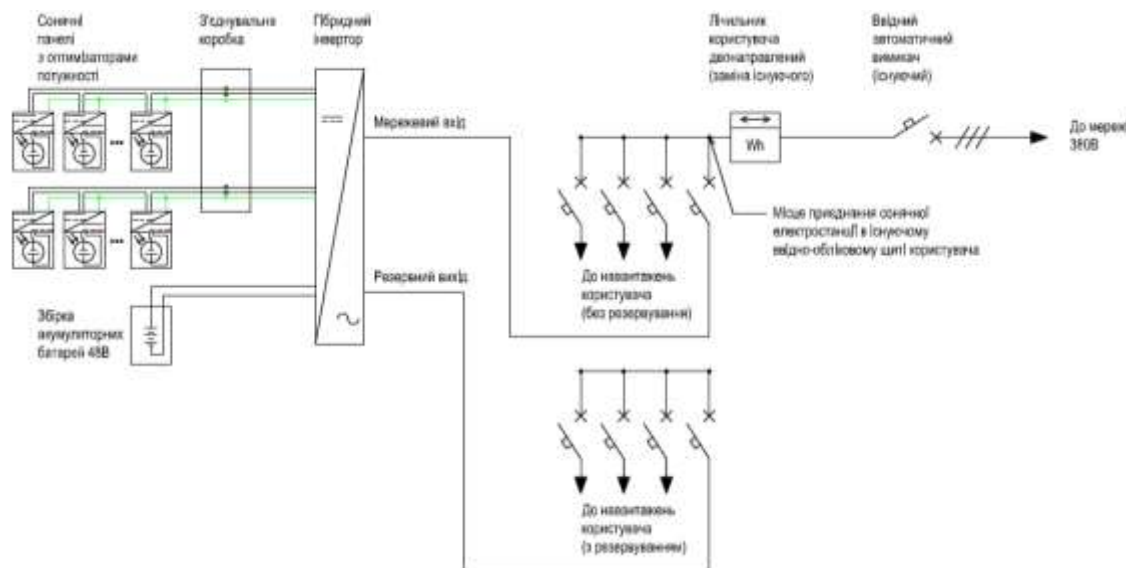


Рисунок 7 – Система електропостачання будинку з резервним джерелом живлення

Схема, представлена на рис. 8 має найбільшу кількість опцій з-поміж усіх розглянутих. Вона містить домашню акумуляторну систему живлення, наприклад, Franklin Home Power. Така система складається з інтелектуального aGate X контролера, генераторний модуль, акумуляторні батареї (рис. 9).

Система Franklin Home Power (FHP) об'єднує електромережу, сонячну генерацію, акумулятори і генератори в надійну систему управління енергією, яка керується за допомогою простого мобільного додатку. FHP забезпечує моніторинг в режимі реального часу та контроль за щоденним енергоспоживанням будинку, а також постачає енергію з декількох джерел енергії під час перебоїв в електромережі. Управління енергоспоживанням FHP здійснюється за допомогою aGate X, інтелектуального контролера, який об'єднує всі джерела живлення і автоматично виявляє перебої в електромережі, щоб плавно перевести будинок на резервне живлення протягом 16 мс.

Модуль інтелектуальних схем aGate X доступний для керування та автоматичного відключення великих енергетичних навантажень під час відключення електроенергії. Він забезпечує індивідуальне планування роботи виділених навантажень для більш ефективного використання.



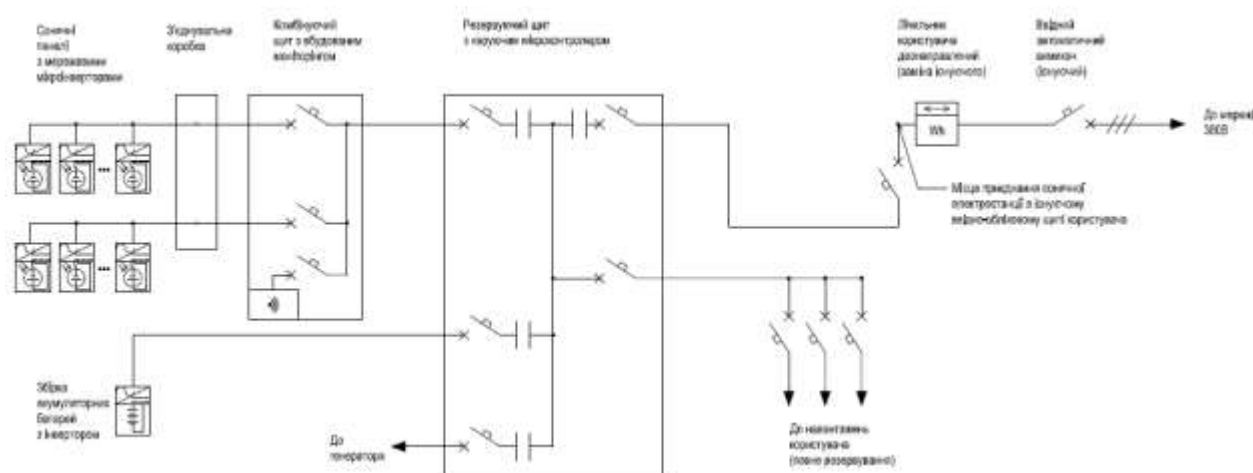


Рисунок 8 – Схема електропостачання з резервуванням та «розумним» контролером

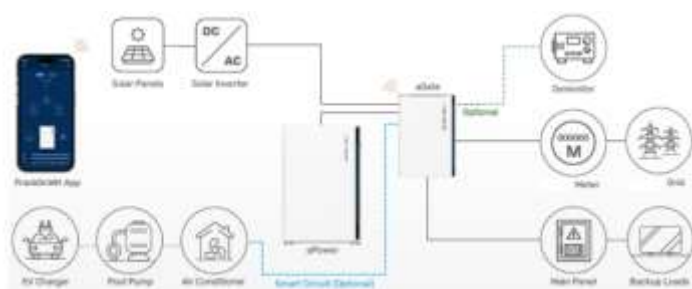


Рисунок 9 - Franklin Home Power

**Висновки.** Питання проектування, улаштування систем електропостачання будівель висвітлені в ДБН В.2.5-23:2010 «Інженерне обладнання будинків і споруд. Проектування електрообладнання об'єктів цивільного призначення». Даний нормативний документ не містить відомостей щодо вимог, порядку улаштування електричної частини установок генерації ВДЕ будівлі. В статті наведені існуючі схеми, що використовуються в країнах Європи, США, та можуть бути використані в нашій країні як у новому будівництві так і в існуючих будівлях з мінімальними змінами в компоновці існуючої системи електропостачання.

#### Список використаної літератури

1. Енергетичний баланс України за 2021 рік. [https://ukrstat.gov.ua/operativ/menu/menu\\_u/energ.htm](https://ukrstat.gov.ua/operativ/menu/menu_u/energ.htm)
2. Закон України «Про енергетичну ефективність будівель». <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2118-19#Text>
3. Методичні рекомендації «Основи проектування та реконструкції енергоефективних будівель закладів загальної середньої освіти з поліпшеними екологічними характеристиками». [https://iem.org.ua/images/library/metodychni\\_rekomendatsiyi\\_shkoly\\_2024.pdf](https://iem.org.ua/images/library/metodychni_rekomendatsiyi_shkoly_2024.pdf)
4. Доповнення Альбому технічних рішень: типові рішення для проектування енергоефективних заходів. <https://eefund.org.ua/novyny/dopovnennya-albomu-tekhniknikh-rishen-tipovi-rishennya-dlya-proektuvannya-energoefektivnikh/>
5. Принципи формування енергоефективних житлових будівель/Власенко В.М., Мартинов В.Л./ East European Scientific Journal #10(74), 2021.
6. Розвиток та принципи проектування енергоефективних житлових будівель-комплексів /Мартинов В.Л. д.т.н., професор кафедри архітектури, Полозюк С.Ю./ Східно Європейський Науковий Журнал, Випуск: 62, Том: 7 - 2020.
7. Urenev, V., & Vakhtin, D. (2020). Досвід проектування енергоефективних громадських будівель державної власності в Україні. Сучасні проблеми Архітектури та Містобудування, (57), 322–339. <https://doi.org/10.32347/2077-3455.2020.57.322-339>
8. Енергетична стратегія України. <https://www.mev.gov.ua/reforma/enerhetychna-stratehiya>
9. В. Омельченко Сектор відновлюваної енергетики України до, під час та після війни. [https://razumkov.org.ua/statti/sekto-vidnovlyuvanoyi-energetyky-ukrayiny-do-pid-chas-ta-pislya-viyny#\\_ftn9](https://razumkov.org.ua/statti/sekto-vidnovlyuvanoyi-energetyky-ukrayiny-do-pid-chas-ta-pislya-viyny#_ftn9)
10. Енергія сонця для діточок. <https://saee.gov.ua/uk/events/previews/5089>
11. Відновлювані джерела енергії для домогосподарств. <https://saee.gov.ua/uk/content/renewables>
12. IEC 62548 Photovoltaic (PV) arrays – Design requirements
13. Photovoltaic Plants-Cutting edge Technology from Sun to socket. ... Photovoltaic Plants-Technology from Sun to socket <https://library.e.abb.com/public/fb75869122d24b408ab985833cd472db/9AKK107492A3277%20Photovoltaic%20plants%20-%20Technical%20Application%20Paper.pdf>
14. ДСТУ ІЕС 60617:2018 Графічні символи для схем (ІЕС 60617:2012 DB, IDT)

O. Lazurenko<sup>1</sup>, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, ORCID 0000-0002-4409-629X

I. Cherneshchuk<sup>2</sup>, Ph. D. student, ORCID 0000-0001-6895-7843

M. Cherkashyn<sup>1</sup>, master student, ORCID 0009-0009-3525-3669

H. Cherkashyna<sup>2</sup>, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, ORCID 0000-0003-3773-7498

<sup>1</sup>National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»

<sup>2</sup>National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

## CONCERNING THE ARRANGEMENT OF THE ELECTRICAL SUPPLY SYSTEM OF BUILDINGS WITH RENEWABLE ENERGY SOURCES

*Buildings are currently one of the largest consumers of energy resources in Ukraine, including electricity[1], accounting for about 40% of energy consumption. In Ukraine, the requirements for energy consumption in buildings are regulated by the Law "On Energy Efficiency of Buildings" through the relevant energy efficiency classes[2]. The issue of improving the energy efficiency of these facilities is a global challenge at the global level. In particular, the 2019 UN Climate Summit set a goal to achieve zero energy consumption in new buildings by 2030 and the same level in existing buildings by 2050. The use of renewable energy sources is an absolute and necessary component of achieving these goals. In addition, it should be understood that the share of renewable energy will grow steadily, in particular in household facilities. Over time, every building will be powered by renewable energy in one way or another. A review of the literature on the design of energy-efficient buildings in terms of engineering systems design revealed a low level of coverage of issues related to the design and design of power supply schemes for buildings with RES[3-7]. The article presents existing circuit solutions for the integration of RES (solar photovoltaic generation) into the building power supply system, in particular, a building power supply system with a grid-tie inverter and power optimizers, a building power supply system with microinverters, a building power supply system with twin microinverters and a prefabricated combined switchboard, a building power supply system with a backup power source, a power supply scheme with redundancy and a smart controller. A variety of schematic solutions for the power supply system allows you to choose the one that will meet a single or a set of criteria: the location of the panels by the cardinal points (one side or several); redundancy; cost; "intelligence" of the system.*

**Keywords:** building power supply system, renewable energy sources (RES), solar electricity generation, photovoltaic power stations (FEC), photovoltaic panel (PV), solar battery (CB), inverter, battery, input panel, distribution panel, junction box, fuse, circuit breaker, surge protector, grounding.

### References

1. Energy balance of Ukraine for 2021. [https://ukrstat.gov.ua/operativ/menu/menu\\_u/energ.htm](https://ukrstat.gov.ua/operativ/menu/menu_u/energ.htm)
2. Law of Ukraine "On Energy Efficiency of Buildings". <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2118-19#Text>
3. Methodical recommendations "Fundamentals of design and reconstruction of energy-efficient buildings of general secondary education institutions with improved environmental characteristics". [https://iem.org.ua/images/library/metodychni\\_rekomendatsiyi\\_shkoly\\_2024.pdf](https://iem.org.ua/images/library/metodychni_rekomendatsiyi_shkoly_2024.pdf)
4. Addition to the Album of technical solutions: typical solutions for designing energy-efficient measures. <https://eefund.org.ua/novyny/dopovnennya-albomu-tekhnikh-rishen-tipovi-rishennya-dlya-proektuvannya-energoefektivnikh/>
5. Principles of forming energy-efficient residential buildings/Vlasenko V.M., Martynov V.L./ East European Scientific Journal №10(74), 2021.
6. Development and principles of designing energy-efficient residential buildings-complexes, Polozhiuk S.Iu./ Skhidno East European Scientific Journal, №62, Tom: 7 -2020.
7. Urenev, V., & Bakhtin, D. (2020). Experience in designing energy-efficient public buildings of state ownership in Ukraine. Contemporary problems of Architecture and Urban Planning, (57), 322–339. <https://doi.org/10.32347/2077-3455.2020.57.322-339>
8. Energy strategy of Ukraine. [www.mev.gov.ua/reforma/enerhetychna-stratehiya](http://www.mev.gov.ua/reforma/enerhetychna-stratehiya)
9. V. Omelchenko Renewable energy sector of Ukraine before, during and after the war. [https://razumkov.org.ua/statti/sekto-vidnovlyuvanoyi-energetyky-ukrayiny-do-pid-chas-ta-pislya-viyny#\\_ftn9](https://razumkov.org.ua/statti/sekto-vidnovlyuvanoyi-energetyky-ukrayiny-do-pid-chas-ta-pislya-viyny#_ftn9)
10. Energy of the sun for children. <https://sae.gov.ua/uk/events/previews/5089>
11. Renewable energy sources for households. <https://sae.gov.ua/uk/content/renewables>
12. IEC 62548 Photovoltaic (PV) arrays – Design requirements
13. Photovoltaic Plants-Cutting edge Technology from Sun to socket. Photovoltaic Plants-Technology from Sun to socket <https://library.e.abb.com/public/fb75869122d24b408ab985833cd472db/9AKK107492A3277%20Photovoltaic%20plants%20-%20Technical%20Application%20Paper.pdf>
14. IEC 60617:2012 DB, IDT

Надійшла: 06.05.2024

Received: 06.05.2024