

Міністерство освіти і науки України
Криворізький національний університет

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

КОБЕЛЯЦЬКИЙ ДАНИІЛ ВІТАЛІЙОВИЧ



УДК 621.316.11

ДИСЕРТАЦІЯ
ЕНЕРГОЕФЕКТИВНЕ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ СПОЖИВАННЯ
ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ПРИЙМАЧАМИ З РІВНЕМ НАПРУГИ
ЖИВЛЕННЯ ДО 1000В ЗАЛІЗОРУДНИХ ШАХТ

Спеціальність 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
Галузь знань 14 – «Електрична інженерія»

Подается на здобуття ступеня доктора філософії

ТОМ 1

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

Д. В. Кобеляцький

Науковий керівник:

Спірук Олег Миколайович,
доктор технічних наук, професор

Кривий Ріг – 2026

АНОТАЦІЯ

Кобеляцький Д.В. Енергоефективне керування процесом споживання електроенергії приймачами з рівнем напруги живлення до 1000В залізорудних шахт. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису, в 2-х томах.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» галузі знань 14 «Електрична інженерія». – Криворізький національний університет, Кривий Ріг, 2026.

Електроенергетичні проблеми в Україні, котрі існували в більшості своїй по факту значних за кількістю та рівнями споживання електроенергії енергоємними виробництвами, в тому числі гірничодобувними та металургійними, вкрай загострились до меж драматизму в сьогоденні з відомих причин.

Новий формат комплексу новостворених електроенергетичних проблем, поєднався в один негатив як для енергетичного, так і для гірничодобувного комплексу держави.

В значній мірі це не минуло і підприємств з видобутку та переробки залізорудної руди – сировини для металургійного виробництва як базового продукту для макро- і мікроекономіки держави. Аспект проблеми цих видів підприємств – значний рівень їх енергоємності, котрий вносить значні негативні завади в процес формування економіки цих видів виробництв, а значить і процесу існування того чи іншого підприємства взагалі.

І якщо, до недавнього, ця проблема існувала на рівні задач, котрі необхідно було вирішувати згідно і в форматі існуючої черги, то тепер це найважливіша проблема, котра потребує не тільки креативного і прискореного рішення, а й відповідної мінімізації в часі впровадження цих рішень в існуючі схеми функціонування гірничорудних підприємств, в тому числі з підземними способами видобутку ЗР.

Аналіз існуючих тактик проведення досліджень «висвітлив» що квінтесенція відомих пошукових форматів в цьому спрямуванні полягає в

тому, що, згідно обґрунтованої пошукачами тактики для умов залізорудних підземних виробництв, дослідження велись, як правило, шляхом вирішення проблеми електроенергоефективності для окремо взятих локальних енергоємних споживачів даних підприємств, з можливістю, в подальшому, поєднання цих систем, а по факту – підсистем в єдину загальновиробничу СК електроенергетикою всього підприємства в цілому.

В розрізі саме цієї дослідницької логіки в останні десятиріччя було досягнуто певного позитиву рішень.

Проте, в «портфелі» таких рішень практично не знайшлося місця для споживачів ЕЕ з напругою живлення до 1000 В, котрі отримують живлення від дільничних підземних підстанцій і котрі являють собою джерела живлення для значної, як по кількості так і по рівням споживання ЕЕ, приймачам.

Між тим, як доведено, в результаті відповідних наукових пошуків, саме ці споживачі, котрі споживають більше 20% від загально споживчого обсягу підземних залізорудних підприємств (рудників, шахт), володіють значною стохастичністю споживання ЕЕ і повною відсутністю керованості режимами їх роботи, що віддзеркалюється на загальному фоні електроспоживання підприємства.

Мета дослідження: теоретичне обґрунтування та розробка формату системи енергоефективного керування процесом споживання електроенергії приймачами з напругою живлення до 1000 В систем електропостачання залізорудних шахт з урахуванням умов технологічної невизначеності в часі режимів їх роботи.

Значимість отриманих результатів наукових досліджень: в розв'язанні важливої науково-практичної проблеми – розроблення концептуальних засад енергоефективного керування рівнями споживання електричної енергії між енергоємними електромеханічними комплексами та формування інформаційно-аналітичної бази щодо обґрунтування

управлінських рішень у процесі функціонування енергетичної системи підземних залізрудних підприємств.

Наукова новизна:

– розроблено, на основі відомих локальних рішень, концепцію, котра узагальнює та розширює межі можливостей реалізації заходів щодо підвищення рівня електроенергоефективності комплексів: електропостачання – електроспоживання підприємств із підземними способами видобутку залізної руди; проведено еквіполентування вхідних параметрів для формування схеми алгоритму керування процесом функціонування комплексом: електропостачання – електроспоживання;

– обґрунтовано та сформовано, як ефективний в своїй варіативності, новий формат підвищення покрокової досяжності електроенергоефективності підземних залізрудних підприємств шляхом керованості режимами роботи локальних споживачів електроенергії з відповідним централізованим управлінням рівнями споживання ними електроенергії, з залученням до цього процесу сегмента споживачів з напругою живлення до 1000 В дільничних підземних підстанцій – складових узагальненого електроенергетичного комплексу: електропостачання – електроспоживання аналізованих видів гірничих підприємств;

– досліджено та проаналізовано показники енергоефективності, вперше виділено взаємопов’язані ланцюги між процесами електропостачання та електроспоживання в умовах підземного гірничорудного виробництва. На відміну від існуючих наукових підходів запропоновано виділяти інформаційну стохастичну кількісну складову, що є підґрунтям формування емерджентних властивостей комплексу енергоефективності задля отримання відповідних рекомендацій щодо ефективного керування процесами функціонування електропостачання;

– на основі реальних умов функціонування залізрудних підприємств та відповідної статистичної інформації розроблено варіант математичної моделі, відмінність котрої складає факт застосування кусково-постійної функції, що

описує залежність ціни електричної енергії від рівнів електроспоживання щодо часу доби;

– уперше розроблено евристичну систему автоматизованого керування споживанням електричної енергії підземними приймачами залізорудних шахт з напругою живлення до 1000 В на основі генетичного алгоритму, що дозволяє залежно від вартості електричної енергії визначати графік роботи споживачів підземних дільничних підстанцій, котрі при дотриманні прийнятих обмежень на погодинну та добову потужність забезпечують мінімізацію витрат на придбання електричної енергії, тим самим зменшуючи собівартість кінцевого продукту підприємства – видобутої залізної руди.

Проведені теоретичні дослідження дисертаційної роботи склали підвалини **практичного оцінювання отриманих результатів**, а саме:

– розроблено та рекомендовано для практичної реалізації концепцію з оцінювання та реалізації заходів щодо підвищення електроенергоефективності електроенергетичного комплексу електропостачання – електроспоживання гірничовидобувних підприємств;

– сформовано методiku з оцінювання існування відповідного резерву при оптимізації рівнів електроспоживання споживачів електроенергетичного комплексу гірничорудних підприємств;

– отримано кількісні оптимізаційні значення затрат щодо рівнів електроспоживання однієї залізорудної шахти протягом доби може бути зменшено на 27,4 %, при збереженні загального обсягу цього показника і можуть прийматись як взірць для досягнення мети;

– розроблено архітектуру евристичної системи керування споживанням електричної енергії електроприймачами напругою до 1000 В на базі еволюційного логічного алгоритму, котра може бути застосована для оптимізації графіку електричних навантажень трансформаторних підстанцій гірничо-металургійних підприємств, зокрема, залізорудних шахт, що працюють на цьому класі напруги.

Результати досліджень вкладені в 2-х томах машинопису. Структурно це виглядає в наступному форматі.

Том 1. У Вступі наведено аналіз проблем в електроенергетиці підприємств гірничодобувної галузі взагалі та гірничорудної зокрема. На фоні загальноіснуючих – енергетичних висвітлені відповідні проблеми в сфері підприємств з підземними способами видобутку залізної руди. Превентивно оцінено перспективи та ефективні спрямування в досягненні позитиву в аналізує мій сфері для даних видів підприємств. Сформовано мету та наукові задачі дослідження.

Приведено наукову та практичну цінність даного дослідження, викладено логістику наукового пошуку.

У Розділі 1 наведено результати оцінювання стану та віддзеркалено на їх фоні проблеми та необхідність підвищення електроенергоефективності видобутку залізної руди в умовах гірничорудних підприємств з підземними способами видобутку залізної руди. Оцінювання проведено з позицій загальної економіки аналізуємих видів гірничих підприємств, фактичного стану та впливу на вищенаведений показник електроенергетики. Проведення зондування та превентивне встановлення реальних можливостей досягнення оптимальних рівнів електроенергоефективності в форматах існуючих технологій ведення гірничих робіт. Визначено стартові позиції та весь формат дослідження.

Доведено, що застосовані перфектні заходи практично вичерпали свій креатив та в значній мірі потенційні можливості і необхідні нові додаткові до відомих варіанти рішень або такі які ще не вичерпали свій потенціал. Один з таких недостатньо досліджених – керування режимами функціонування споживачів з напругою живлення 0,4 кВ. як сегмента загальної структури комплексу: електропостачання – електроспоживання підземного гірничорудного підприємства з перспективою включення даної системи, на правах підсистеми, в централізовану структуру АСК електроенергетикою даного підприємства.

У Розділі 2 наведені дослідження формату пошуку та відповідних варіантів схем з підвищення електроенергоефективності вітчизняних підземних залізрудних підприємств.

Висвітлено та оцінено параметри впливових факторів на процес споживання електроенергії, та показано їх відмінність від підприємств з видобутку інших видів корисних копалин, що віддзеркалює необхідність індивідуалізації пошукової розбудови логістики отримання рішень.

Стверджено, що в умовах сучасних технологій видобутку залізної руди підземним способом, в межах існуючих технологій, необхідний новий формат підходу до вирішення проблеми електроенергоефективності даних видів підприємств. Таку можливість дає системний підхід. Для оцінювання рівнів, та отримання ефективних варіантів спрямувань, розроблена дослідницька математична модель, котра дозволила визначатись з відповіддю на це питання.

У Розділі 3 приведено обґрунтування формату протікання електроенергетичних процесів в електроенергетичному комплексі: електропостачання – електроспоживання як стохастичного виду. Надано результати моделювання електроенергетичних процесів, в такому форматі в комплексах СЕП 0,4 кВ. Такий підхід дозволив визначити більш глибокі і в значній мірі системо визначальні характеристики процесу, які пов'язані з випадковістю їх протікання.

Це дало можливість побудувати цільову функцію, котра враховує коливання рівнів електроспоживання приймачами в годинах доби, з послідуною розробкою відповідної дослідницької математичної схеми. Важливою особливістю та цінністю для наукового пошуку запропонованої математичної моделі є те, що залежність ціни електроенергії задається як кускова – постійна функція. Отримані теоретичні результати, при порівнянні з реальними даними, дозволило дійти висновку про існування реального резерву при оптимізації рівнів електроспоживання, в часі – годинах доби, який є похідним при ефективному обліку відповідних тарифів на електроенергію.

Це підтверджується шляхом порівняння реальних затрат з оптимальними при оцінюванні процесу електроспоживання і для викладеного прикладу, складає біля 27,4 %.

У Розділі 4 викладено логіку розбудова та авторський варіант системи автоматизованого керування споживанням електричної енергії електроприймачами з напругою живлення до 1000 В гірничорудних підприємств з підземними способами видобутку залізної руди, що мінімізує витрати на закупівлю електроенергії виробництвом, згідно існуючої в Україні логістики розрахунків – на добу наперед. Задача керування споживанням електричної енергії зведена до бінарної форма змішаного цілочисельного програмування, яка розв’язується з використанням генетичного алгоритму. Проаналізовано вплив налаштувань генетичного алгоритму, як-то число фенотипів у популяції, число елітних фенотипів, які переходять незмінними у наступне покоління, та метод схрещування фенотипів на якість оптимізації процесу енергоспоживання.

У Загальних висновках наведено в стислому варіанті результати досліджень та рекомендації щодо їх подальшого використання.

У томі 2 надано ряд додаткових матеріалів, котрі доповнюють та розширюють логіку основної дослідницької частини наукового пошуку.

Ключові слова: електротехнічні комплекси, електротехнічні системи, електроенергія, енергопотоки, керування, енергоефективність.

ANNOTATION

Kobelyatsky D.V. Energy-efficient control of electricity consumption by receivers with a supply voltage of up to 1,000 V in iron ore mines.

Qualifying scientific work on manuscript rights. Dissertation for obtaining the scientific degree of Doctor of Philosophy for specialty 141 "Power engineering, electrical engineering and electromechanics" branch of knowledge 14 "Electrical engineering". – Kryvyi Rih National University, 2025, in 2 volumes.

Electricity problems in Ukraine, which existed for the most part due to the fact that energy-intensive industries, including mining and metallurgical ones, are significant in terms of quantity and levels of electricity consumption, have become extremely acute to the point of drama for known reasons since February 2022.

The new format of the complex of electric energy problems, created by the fact of aggression of the Russian Federation, combined into one negative for both the energy and mining complexes of the state.

To a large extent, it did not pass by enterprises for the extraction and processing of iron ore - raw material for metallurgical production as a basic product for the macro and micro economy of the state. The aspect of the problem of these types of enterprises is a significant level of their energy intensity, which brings significant negative effects obstacles to the process of forming the economy of these types of production, and therefore to the process of existence of this or that enterprise in general.

And if, until recently, this problem existed at the level of tasks that had to be solved according to and in the format of the existing queue, now it is the most important problem that requires not only a creative and accelerated solution, but also a corresponding minimization in the time of implementation of these solutions in the existing schemes functioning of mining enterprises, including those with underground methods of mineral extraction.

The analysis of the existing research tactics "revealed" that the quintessence of the well-known search formats in this direction is that, according to the tactics

justified by the searchers for the conditions of underground iron ore production, the research was carried out, as a rule, by solving the problem of electricity and energy efficiency for separately taken local energy-intensive consumers of these enterprises, with the possibility, in the future, of combining of these systems, and in fact - subsystems into a single general production CS by the electric power industry of the entire enterprise as a whole.

In the context of this research logic, certain positive solutions have been achieved in recent decades.

However, in the "portfolio" of such solutions, there was practically no place for electricity consumers with a supply voltage of up to 1000 V, which receive power from district underground substations and which are power sources for significant, both in terms of quantity and levels of electricity consumption, consumers.

Meanwhile, it has been proven, as a result of relevant scientific research, that these consumers, who consume more than 20% of the total consumption volume of underground iron ore enterprises (mines, mines), have a significant stochasticity of electricity consumption and a complete lack of controllability of their work modes, which is reflected in the general background of the enterprise's electricity consumption.

The purpose of the research: theoretical justification and development of a system format for energy-efficient control of electricity consumption by receivers with a supply voltage of up to 1000 V in the power supply systems of iron ore mines, taking into account the conditions of technological uncertainty regarding the timing of their operating modes.

The significance of the obtained results of scientific research: in solving an important scientific and practical problem the development of conceptual principles of energy-efficient management of the levels of electrical energy consumption between energy-intensive electromechanical complexes and the formation of an information-analytical base for the justification of management decisions in the process of functioning of the energy system of underground iron ore enterprises.

Scientific novelty:

- developed, based on known local solutions, a concept that summarizes and expands the scope of the implementation of measures for increasing the level of power efficiency of complexes: power supply - power consumption of enterprises with underground mining methods iron ore; the input parameters for generation of operation process control algorithm circuit complex: power supply - power consumption;

- substantiated and formed as effective in its variability, a new format for increasing the step-by-step reach of the electric power efficiency of underground iron ore enterprises by controlling the modes of operation of local electricity consumers with appropriate centralized control of their electricity consumption levels, involving in this process a segment of consumers with a supply voltage of up to 1000 V of district underground substations - components of a generalized electric power complex: power supply - power consumption of analyzed types of mining enterprises;

- energy efficiency indicators were researched and analyzed, for the first time interrelated circuits between the processes of power supply and power consumption in the conditions of underground mining were identified. In contrast to the existing scientific approaches, it is proposed to single out the informational stochastic quantitative component, which is the basis for the formation of emergent properties of the energy efficiency complex in order to obtain appropriate recommendations for the effective management of the processes of functioning of electricity supply;

- on the basis of the real conditions of functioning of iron ore enterprises and relevant statistical information, a variant of a mathematical model has been developed, the difference of which is the fact of using a piecewise-constant function describing the dependence of the price of electric energy on the levels of power consumption relative to the time of day;

- for the first time, a heuristic system for automated control of electricity consumption by underground electric receivers of iron ore mines with a supply voltage of up to 1000 V was developed based on an evolutionary genetic algorithm,

which allows, depending on the planned volumes of ore production and the cost of electric energy per day, to determine in advance the optimal schedule of electrical loads of underground district substations, which, subject to the accepted restrictions on hourly and daily capacity, ensure minimization of costs for the purchase of electric energy, thereby reducing the cost of the final product of the enterprise - mined iron ore.

The conducted theoretical studies of the dissertation work made up the foundations of the **practical assessment of the results obtained**, namely:

- developed and recommended for practical implementation a concept for assessing and implementing measures to improve the electricity efficiency of the electric power supply complex - the power consumption of mining enterprises;
- a methodology has been formed to assess the existence of an appropriate reserve while optimizing the levels of electricity consumption of consumers of the electric power complex of mining enterprises;
- quantitative optimization values of costs relative to the levels of power consumption of one iron ore mine during the day can be reduced by 27,4%, while maintaining the total volume of this indicator and can be taken as a model for achieving the goal;
- an architecture of a heuristic system for controlling the consumption of electric energy by electric receivers with voltage up to 1000 V was developed on the basis of an evolutionary logical algorithm, which can be used to optimize the schedule of electrical loads of transformer substations of mining and metallurgical enterprises, in particular, iron ore mines operating on this voltage class.

The results of the research are enclosed in 2 volumes of the typescript. Structurally, it looks in the following format.

Volume 1. The Introduction provides an analysis of problems in the electric power of enterprises in the mining industry in general and mining in particular. Against the background of common energy problems, relevant problems in the field of enterprises with underground methods of iron ore extraction are highlighted. Prospects and effective directions for achieving positive results in my field of

analysis for these types of enterprises are preemptively assessed. The purpose and scientific tasks of the research were formed.

The scientific and practical value of this research is presented, the logistics of scientific research are outlined.

In Section 1, the results of the state assessment are presented and the problems and the need to increase the energy efficiency of iron ore extraction in the conditions of mining enterprises with underground methods of iron ore extraction are reflected against their background. The evaluation was carried out from the standpoint of the general economy of the analyzed types of mining enterprises, the actual state and the impact on the above indicator of the electric power industry. Probing and preventive establishment of real possibilities of achieving optimal levels of energy efficiency in the formats of existing mining technologies. The starting positions and the entire research format have been determined.

It has been proven that the applied perfect measures have practically exhausted their creativity and to a large extent potential opportunities and new solutions additional to the known options or those that have not yet exhausted their potential are needed. One of those insufficiently researched is the management of the operating modes of consumers with a supply voltage of 0.4 kV. as a segment of the overall structure of the complex: electricity supply - electricity consumption of an underground mining enterprise with the prospect of including this system, as a subsystem, in the centralized structure of ACS by the electric power industry of this enterprise.

In Section 2, research on the search format and corresponding options for schemes to improve the energy efficiency of domestic underground iron ore enterprises are given.

The parameters of influencing factors on the process of electricity consumption are highlighted and evaluated, and their difference from enterprises producing other types of minerals is shown, which reflects the need to individualize the search development of the logistics of obtaining solutions.

It has been asserted that in the conditions of modern technologies of underground iron ore mining, within the limits of existing technologies, a new format of approach to solving the problem of energy efficiency of these types of enterprises is necessary. A systematic approach provides such an opportunity. A research mathematical model was developed to assess the levels and obtain effective direction options, which allowed to determine the answer to this question.

In Section 3, the justification of the format of the flow of electric energy processes in the electric energy complex is presented: electricity supply - electricity consumption as a stochastic type. The results of simulation of electric power processes are presented in this format in PSS 0.4 kV complexes. This approach made it possible to determine deeper and to a large extent system-determining characteristics of the process, which are related to the randomness of their occurrence.

This made it possible to build an objective function that takes into account fluctuations in the levels of electricity consumption by receivers in the hours of the day, with the subsequent development of a corresponding research mathematical scheme. An important feature and value for scientific research of the proposed mathematical model is that the dependence of the electricity price is given as a piecewise - constant function. The obtained theoretical results, when compared with real data, made it possible to conclude about the existence of a real reserve in the optimization of electricity consumption levels, in time - hours of the day, which is a derivative in the effective accounting of the relevant electricity tariffs. This is confirmed by comparing the actual costs with the optimal ones when evaluating the power consumption process and for the given example, it is about 27.4%.

In the fourth Section, the logic of the development and the author's version of the system of automated control of the consumption of electrical energy by electrical receivers with a supply voltage of up to 1000 V of mining enterprises with underground methods of iron ore extraction, which minimizes the costs of purchasing electricity by production, according to the logistics of calculations existing in Ukraine - one day in advance, are laid out. The problem of managing the

consumption of electrical energy is reduced to a binary form of mixed integer programming, which is solved using a genetic algorithm. The impact of the genetic algorithm settings, such as the number of phenotypes in the population, the number of elite phenotypes that pass unchanged to the next generation, and the method of crossing phenotypes on the quality of the optimization of the energy consumption process, is analyzed.

The General Conclusions summarize the research results and recommendations for their further use.

Volume 2 provides a number of additional materials that complement and expand the logic of the main research part of the scientific search.

Keywords: electrotechnical complexes, electrotechnical systems, electricity, energy flows, control, energy efficiency.

ПЕРЕЛІК НАУКОВИХ ПРАЦЬ ЗДОБУВАЧА КОБЕЛЯЦЬКОГО ДАНИЇЛА ВІТАЛЬОВИЧА

Монографії

[1] Sinchuk O.M., Mykhailenko O.Yu., Kobeliatskyi D.V. A heuristic system for controlling the levels of electricity in the conditions of mining enterprises with underground methods of iron ore mining: monograph. Warsaw: iScience Sp z.o.o. 2024. 77 p. ISBN 978-83-66216-99-0

Статті

[2] Sinchuk O.M., Rogoza M.V., Mykhailenko O.Yu., Kobeliatskyi D.V., Fedotov, V.O. Heuristic control of power consumption by up to 1000 V electrical loads at mining enterprises. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2024. Vol. 1. Pp. 84–92. DOI: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2024-1/084> (Scopus)

[3] Sinchuk O.M., Mykhailenko O. Yu., Kobeliatskyi D.V., Strzelecki R. Simulation of power consumption control of receivers at underground iron ore mining enterprises. *Applied Aspects of Information Technology*. 2023. Vol. 6, No 4. Pp. 404–417. DOI: <https://doi.org/10.15276/aait.06.2023.27>

[4] Sinchuk O. N., Kobeliatskyi D. V. Modeling assessment of power consumption efficiency at iron ore mining enterprises. *Applied Aspects of Information Technology*. 2023. Vol. 6, No 1. Pp. 43–51. DOI: <https://doi.org/10.15276/aait.06.2023.3>

[5] Sinchuk O., Strzelecki R., Beridze T., Peresunko I., Baranovskyi V., Kobeliatskyi D., Zapalskyi V. Model studies to identify input parameters of an algorithm controlling electric supply/consumption process by underground iron ore enterprises. *Mining of Mineral Deposits*. 2023. Vol. 17, No. 3. P. 93–101. DOI: <https://doi.org/10.33271/mining17.03.093> (Scopus)

Тези

[6] Кобеляцький Д. В. Маневрове керування режимами споживання електроенергії приймачами шахтних дільничих підземних підстанцій.

Розвиток промисловості та суспільства: матеріали міжнародної науково-технічної конференції (23-24 травня 2024 р.). Криворізький національний університет. Кривий Ріг, 2024. С. 90.

[7] Сінчук О.М., Сьомочкін А.Б., Барановська М.Л., Кобеляцький Д.В. До проблеми покращення якості електричної енергії у внутрішньошахтних електричних мережах шляхом їх переводу на підвищені рівні напруги. *Розвиток промисловості та суспільства: матеріали міжнародної науково-технічної конференції (24-26 травня 2023 р.). Криворізький національний університет. Кривий Ріг, 2023. С. 56.*

[8] Сінчук О. М., Кобеляцький Д. В. Стохастичність в моделюванні системи постачання-споживання електричної енергії. *Розвиток промисловості та суспільства: матеріали міжнародної науково-технічної конференції (24-26 травня 2023 р.). Криворізький національний університет. Кривий Ріг, 2023. С. 63.*

[9] Кобеляцький Д. В., Сінчук О. М., Берідзе Т. М. Математичні прогнозні моделі в парадигмі формування системи постачання-споживання-виробництво. *Розвиток промисловості та суспільства: матеріали міжнародної науково-технічної конференції (24-26 травня 2023 р.). Криворізький національний університет. Кривий Ріг, 2023. С. 68.*

[10] Кобеляцький Д. В., Сінчук О. М., Барановська М. Л. Перевід внутрішньошахтних електричних мереж на підвищенні рівні напруг - шлях до розбудови ефективних АСК для управління електроенергетичним комплексом залізорудних шахт. *Розвиток промисловості та суспільства: матеріали міжнародної науково-технічної конференції (24-26 травня 2023 р.). Криворізький національний університет. Кривий Ріг, 2023. С. 68.*

[11] Сінчук О.М., Кобеляцький Д.В. Microgrid і внутрішньошахтні електричні мережі напругою живлення до 1000В. *Розвиток промисловості та суспільства: матеріали міжнародної науково-технічної конференції (28-30 травня 2025 р.). Криворізький національний університет. Кривий Ріг, 2025. С. 127.*

[12] Сінчук О.М., Михайленко О.Ю., Кобеляцький Д.В. До проблеми «розумного» керування живленням приймачів до 1000 В підземних

гірничорудних підприємств. *Інформатика. Культура. Техніка*: матеріали міжнародної науково-практичної конференції (Одеса, 16-17 жовтня 2025). НУ «Одеська політехніка». Одеса. 2025. С. 515–520.
<https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.77>

[13] Sinchuk O., Mykhailenko O., Kobeliatskyi D. Optimization of the working schedule of electric receivers with voltage up to 1000 V based on genetic algorithm in iron ore mines. *Розвиток промисловості та суспільства*: матеріали міжнародної науково-технічної конференції (2026 р.). Криворізький національний університет. Кривий Ріг, 2026.

[14] Sinchuk I., Baranovskyi V., Kobeliatskyi D., Yalovoy O. To the discussion about the necessity of standardization of quality indicators of power supply of domestic mining and metallurgical enterprises. *Розвиток промисловості та суспільства*: матеріали міжнародної науково-технічної конференції (2026 р.). Криворізький національний університет. Кривий Ріг, 2026.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	22
ВСТУП.....	23
РОЗДІЛ 1. СТАН, НЕОБХІДНІСТЬ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ШЛЯХІВ ПОДАЛЬШОГО ПІДВИЩЕННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГО- ЕФЕКТИВНОСТІ ВИДОБУТКУ ЗАЛІЗНОЇ РУДИ В УМОВАХ ПІДЗЕМНИХ ГІРНИЧОРУДНИХ ПІДПРИЄМСТВ (ШАХТ, РУДНИКІВ).....	32
1.1 Стан та проблеми гірничорудної промисловості України та місце в цьому електроенергетичної складової процесу видобутку залізної руди	32
1.2 Прогнозне оцінювання стану та перспектив електроенергетики в структурі діючої технології типових вітчизняних залізрудних шахт..	36
1.3 Обґрунтування варіативних перспектив підвищення режимних показників функціонування електроенергетичного комплексу: електропостачання - електроспоживання залізрудних шахт. Формулювання завдань наукового пошуку.....	45
1.4 Висновки до розділу 1.....	50
РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ СТАНУ ТА СПРЯМУВАНЬ ПО ФОРМАТУ ЕНЕРГООРІЄНТОВАНИХ РЕЖИМІВ ПОСТАЧАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ В УМОВАХ ЗАЛІЗОРУДНИХ ШАХТ	52
2.1 Аналітика варіативності розбудови експлуатуємих та перспективних систем електропостачання вітчизняних залізрудних шахт.....	52
2.2 Дослідження стану функціонування електроенергетичного комплексу: електропостачання – електроспоживання залізрудних шахт.....	65

2.3 Засадничі імперативи моніторингу процесу: електропостачання – електроспоживання – обсяги видобутку залізної руди як системи.....	79
2.4 Висновки до розділу 2.....	97
РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ФУНКЦІОНУВАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНОГО КОМПЛЕКСУ В УМОВАХ ТЕХНОЛОГІЇ РОБОТИ ПІДЗЕМНИХ ЗАЛІЗОРУДНИХ ПІДПРИЄМСТВ	99
3.1 Дослідження електроспоживання, як формату стохастичного процесу в умовах залізорудних шахт	99
3.2 Статистичний аналіз часових рядів електроенергетичного комплексу електропостачання – електроспоживання залізорудних шахт.....	114
3.3 Моделювання ефективності споживання електричної енергії приймачами напругою живлення до 1000 В дільничних підземних підстанцій	142
3.4 Висновки до розділу 3.....	153
РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ РІВНЯМИ СПОЖИВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ ПРИЙМАЧАМИ З НАПРУГОЮ ЖИВЛЕННЯ ДО 1000 В ЗАЛІЗОРУДНИХ ШАХТ	155
4.1 Обґрунтування та вибір методу керування енергоспоживанням підземних приймачів електричної енергії напругою живлення до 1000 В	155
4.2 Математичне описання задачі керування енергоспоживанням підземних приймачів електричної енергії напругою живлення до 1000 В.....	159
4.3 Оцінювання якості роботи евристичної системи керування енергоспоживанням підземних приймачів електричної енергії напругою до 1000 В з визначенням раціональних налаштувань	

генетичного алгоритму.....	161
4.3.1 Генетичний алгоритм з розміром популяції 100 фенотипів, число елітних фенотипів 10	163
4.3.2 Генетичний алгоритм з розміром популяції 100 фенотипів, число елітних фенотипів 5	171
4.3.3 Генетичний алгоритм з розміром популяції 200 фенотипів, число елітних фенотипів 20	175
4.3.4 Генетичний алгоритм з розміром популяції 200 фенотипів, без елітних фенотипів	180
4.4 Обговорення результатів.....	186
4.5 Висновки до розділу 4.....	188
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	190
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ.....	196

**ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ,
котрі були використані при викладанні тексту
дисертаційного дослідження**

ЗР	— залізна руда;
КК	— корисна копалина
ЕЕ	— електрична енергія;
ЕЕС	— електроенергетична система
СК	— система керування;
СЕП	— система електропостачання;
САК	— система автоматизованого керування;
ЦРП	— центральна підземна підстанція;
МНК	— метод найменших квадрантів;
ЕП	— електропостачання;
ЕН	— електричне навантаження;
ДПП	— дільнична підземна підстанція;
РП	— розподільний пункт;
РПП	— розподільна підземна підстанція;
ПД ПП	— пересувна дільниця підземної підстанції;
ОЕСУ	— об'єднана енергосистема України;
ГПП	— головні понижувальні підстанції;
БРП	— блоковий розподільний пункт;
ПЕР	— паливно-енергетичні ресурси;
ДСТУ	— Державний стандарт України;
ПУЕ	— правила улаштування електроустановок;
ПТБ	— правила техніки безпеки.
ЕСК	— евристична система керування
ГА	— генетичний алгоритм
ЗЦЛП	— змішане цілочисельне лінійне програмування

ВСТУП

Сучасні і суттєво скориговані, з відомих причин, в останні роки орієнтири досяжності економічної стабільності в розвитку України, в значній мірі базувались, базуються і ще не одне десятиріччя будуть базуватись на стані енергетичної, а, точніше, електроенергетичної та гірничо-металургійної галузей промисловості [1-4].

Перша з вищенаведених базових складових, починаючи з 2014 року по об'єктивним причинам, знизила обсяги виробництва своєї продукції – електроенергії, створивши, таким чином, в країні прогресуючий у часі дефіцит даного виду продукції, а друга – відповідно, недоотримуючи, як споживач, стабільно необхідного рівня ЕЕ, не в змозі реалізувати необхідні планові показники з видобутку та переробки свого продукту – залізної руди – сировини для металургійного виробництва, котре являє собою базову складову макро- та мікроекономіки держави [5, 6].

Тобто, факт – має місце негативний дисбаланс, котрий необхідно мінімізувати шляхом пошуку взаємодії двох стратегічних для економіки і безпеки держави видів виробництв – електроенергетичної та гірничо-металургійної.

Актуальність досліджень. Гірничорудні підприємства всіх реально існуючих типів та видів, в тому числі з підземними способами видобутку залізної руди, являють собою зразки енергоємних виробництв з їх індивідуальною технологічною специфікою функціонування, що різнить ці види гірничих виробництв в порівнянні з їх аналогами – підземними підприємствами з видобутку інших видів корисних копалин в тому числі таких як вугілля, кам'яна сіль, тощо [7, 8].

Технологічно специфіка функціонування підземних гірничорудних підприємств віддзеркалюється на стані електроенергетики цих видів виробництв [9-12], котру, як факт сьогодення, реально характеризувати як драматичний по ряду показників [13-15].

Причина такого висновку лежить як у практичній відсутності активних варіантів такі, в значній, мірі вичерпаності застосовуваних перфектних тривіальних заходів вирішення проблеми електроефективності підприємств аналізованої галузі промисловості, так і від вилучення з «дорожньої карти» реалізації цього процесу окремих складових – сегментів електроенергетичного комплексу: електропостачання – електроспоживання.

До таких «обділених увагою» відноситься значна по кількості когорта споживачів ЕЕ з напругою живлення до 1000 В, а точніше для умов залізрудних шахт, як правило це 0,4 кВ і рідко 0,66 кВ і котрі отримують живлення в більшості своїй від ДПП [14-18]. Саме ці споживачі володіють до 30 % від обсягу електроенергії, котру споживають підземні споживачі залізрудних шахт [15-18]. Проте, поки що, станом на зараз цей сегмент електроенергетики залізрудних шахт є найменш дослідженим, а оцінюючи ті заходи з підвищення енергоефективності саме цих споживачів ЕЕ, котрі є в практиці їх функціонування, то вони характеризуються як псевдоактивні [18-21].

Як факт, в тому числі такої «недоуваги» та певної дослідницької обмеженості є те, що процес стримування темпів зростання електроенергоємності видобутку ЗР підземними способами в масштабах залізрудних підприємств України в останні 10-20-ть років значно сповільнився [21-34].

Настав час, коли потрібно «розчохлити» нові, поки-що далеко не вичерпані і мало реалізовані заходи, котрі дадуть можливість отримувати позитивну різницю між тим рівнем показника енергоефективності що був, чи є, і потенційно досяжним. До таких заходів відноситься процес керування режимами споживання ЕЕ приймачами шахти взагалі і, в тому числі, споживачами ДПП [39-40].

При цьому, з метою отримання достатньо ефективного кінцевого рішення, схема такого керування повинна базуватись на реалізації багатокритеріального формату управлінських рішень [33-35].

Тобто, логічно, що варіант ручного керування тут не може бути прийнятним, а СК повинна бути автоматизованого виду і з можливістю застосування «розумного» керування з реальною перспективою в подальшому реалізації в форматі наближеному, або, що краще, відповідному до концепції Smart Grid.

Для досягнення цієї мети, як сегмента вирішення глобальної проблеми – підвищення електроенергоефективності гірничих підприємств, стартовою необхідною позицією на шляху досягності вбачається отримання нових системоутворюючих доповнень до існуючих методів з дослідження електроенергетики, як процесу, в тому числі її складовою – споживачів ЕЕ до 1000 В, у відповідності до конкретики технологічності їх формації з оцінюванням рейтингу впливових на цей процес факторів та формалізації характеру і діапазону змін відповідних електроенергетичних параметрів, для розбудови логістики функціонування відповідної узагальненої структури АСК.

Саме враховуючи таке твердження, формувалась логістика даного наукового дослідження.

Зв'язок з науковими програмами, планами, темами науково-дослідних робіт.

Дисертаційне дослідження виконувалось в розрізі науково-дослідних робіт, котрі проводились кафедрою електричної інженерії Криворізького національного університету, в тому числі протягом 2020-2026 років, і виконано за пріоритетним напрямом Міністерства освіти і науки України «Енергетика та енергоефективність» та відповідно до завдань держбюджетної науково-дослідницької роботи (номер держреєстрації 0121U11709) «Виконання завдань перспективного плану розвитку наукового напрямку «Технічні науки» (Завдання 2). Етап 2 2022 року «Дослідження можливостей використання методу рою часток для оптимізації конфігурації включення автономних джерел живлення».

Мета дослідження – теоретичне обґрунтування та розробка формату системи енергоефективного керування процесом споживання електроенергії приймачами з напругою живлення до 1000 В систем електропостачання залізорудних шахт з урахуванням умов технологічної невизначеності в часі режимів їх роботи.

Для досягнення мети досліджень сформовано і знайдено рішення наступних **наукових завдань**:

- в форматі узагальненої концепції, в сукупності цілісного процесу підвищення електроенергоефективності видобутку залізної руди підземним способом, вирішити та розробити у межах комплексу: електропостачання – електроспоживання проблему ефективності функціонування сегменту електричних мереж напругою живлення до 1000 В; проаналізувати стан, оцінити, встановити та спрогнозувати закономірності параметричних змін у порівнянні з минулими періодами та з прогнозними в майбутньому, функціонування, електроенергетичних комплексів згідно сучасних умов роботи залізорудних шахт;

- встановити та оцінити системні складові енергоефективності функціонування технологічного комплексу: електропостачання – електроспоживання – обсяги видобутку залізної руди, з метою визначення емерджентних властивостей; сформувати математичні оптимізаційні моделі щодо формату розбудови шляхів визначення рівнів ефективності функціонування електроенергетичного комплексу на основі дослідження процесів електроспоживання стохастичних як форматів в умовах видобутку залізорудної сировини;

- виконати синтез структури та метод функціонування варіанту системи автоматизованого керування споживанням електричної енергії підземними електроприймачами залізорудних шахт з напругою живлення до 1000 В, яка дозволить здійснювати пряме управління навантаженням до промислової електроенергосистеми для забезпечення мінімуму витрат на придбання

електричної енергії залежно від обсягів видобутку залізної руди та вартості закупаємої електричної енергії;

– дослідити шляхом модельного пошуку ефективність варіантів автоматизованого керування споживанням електричної енергії підземними електроприймачами напругою до 1000 В при застосуванні варіативних структур САК і різних налаштуваннях алгоритмів їх роботи з перспективою її структурування з підпорядкуванням в загальну об'єднану систему «розумного» керування електроенергетикою всього підприємства.

Методи досліджень. В процесі наукового пошуку використовувались аналітичні та експериментальні методи досліджень, в тому числі, які базувались на положеннях теорії ймовірностей і математичної статистики, теорії дослідження операцій, прийняття рішень та оптимізації. Експериментальні методи ґрунтувались на положеннях теорії планування експерименту та електричних вимірів.

Наукова новизна одержаних результатів:

– розроблено, на основі відомих локальних рішень, концепцію, котра узагальнює та розширює межі можливостей реалізації заходів щодо підвищення рівня електроенергоефективності комплексів: електропостачання – електроспоживання підприємств із підземними способами видобутку залізної руди; проведено еквіполентування вхідних параметрів для формування схеми алгоритму керування процесом функціонування комплексом: електропостачання – електроспоживання;

– обґрунтовано та сформовано, як ефективний в своїй варіативності, новий формат підвищення покрокової досяжності електроенергоефективності підземних залізрудних підприємств шляхом керованості режимами роботи локальних споживачів електроенергії з відповідним централізованим управлінням рівнями споживання ними електроенергії, з залученням до цього процесу сегмента споживачів з напругою живлення до 1000 В дільничних підземних підстанцій – складових узагальненого електроенергетичного

комплексу: електропостачання – електроспоживання аналізованих видів гірничих підприємств;

– досліджено та проаналізовано показники енергоефективності, вперше виділено взаємопов’язані ланцюги між процесами електропостачання та електроспоживання в умовах підземного гірничорудного виробництва. На відміну від існуючих наукових підходів запропоновано виділяти інформаційну стохастичну кількісну складову, що є підґрунтям формування емерджентних властивостей комплексу енергоефективності задля отримання відповідних рекомендацій щодо ефективного керування прийняттям відповідних рекомендацій щодо керування процесами функціонування електропостачання;

– на основі реальних умов функціонування залізрудних підприємств та відповідної статистичної інформації розроблено варіант математичної моделі, відмінність котрої складає факт застосування кусково-постійної функції, що описує залежність ціни електричної енергії від рівнів електроспоживання щодо часу доби;

– уперше розроблено евристичну систему автоматизованого керування споживанням електричної енергії підземними приймачами залізрудних шахт з напругою живлення до 1000 В на основі генетичного алгоритму, що дозволяє залежно від вартості електричної енергії визначати графік роботи споживачів підземних дільничних підстанцій, котрі при дотриманні прийнятих обмежень на погодинну та добову потужність забезпечують мінімізацію витрат на придбання електричної енергії, тим самим зменшуючи собівартість кінцевого продукту підприємства – видобутої залізної руди.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій.

Наукове значення роботи:

– розроблено та рекомендовано для практичної реалізації концепцію з оцінювання та реалізації заходів щодо підвищення електроенергоефективності електроенергетичного комплексу електропостачання – електроспоживання гірничовидобувних підприємств;

– сформовано методику з оцінювання існування відповідного резерву при оптимізації рівнів електроспоживання споживачів електроенергетичного комплексу гірничорудних підприємств;

– отримано кількісні оптимізаційні значення затрат щодо рівнів електроспоживання однієї залізорудної шахти протягом доби може бути зменшено на 27,4 %, при збереженні загального обсягу цього показника і можуть прийматись як взірці для досягнення мети;

– розроблено архітектуру евристичної системи керування споживанням електричної енергії електроприймачами напругою до 1000 В на базі еволюційного логічного алгоритму, котра може бути застосована для оптимізації графіку електричних навантажень трансформаторних підстанцій гірничо-металургійних підприємств, зокрема, залізорудних шахт, що працюють на цьому класі напруги.

Практичне значення отриманих результатів досліджень

Одержані наукові результати дисертаційної роботи передано ТОВ «Ракурс» (м. Кривий Ріг) для подальшого використання їх при розробці проєктів модернізації систем електропостачання гірничорудних та металургійних підприємств України, що підтверджено актом про впровадження (Додаток Є). Результати роботи також використовуються у Криворізькому національному університеті на кафедрі електричної інженерії при підготовці здобувачів спеціальності G3 – Електрична інженерія за бакалаврським і магістерським рівнями вищої освіти, що підтверджено актом про впровадження (Додаток Є).

Об'єкт дослідження: електроенергетичні процеси в системах електропостачання з напругою живлення споживачів до 1000В в умовах залізорудних шахт.

Предмет дослідження: електроенергетичні параметри функціонування комплексу електропостачання – електроспоживання внутрішніх електроенергетичних мереж з напругою живлення споживачів до 1000В залізорудних шахт.

Особистий внесок здобувача. Наукові положення та результати, котрі викладені в дисертаційній роботі, отримані здобувачем самостійно. В наукових публікаціях, котрі виконані в співавторстві, автору належить: [1] – запропоновано контроль рівнів електроенергії в умовах роботи шахт; [2] – запропоновано контроль споживання електроенергії навантаженням напругою до 1000 В гірничих підприємств; [3] – проведення моделювання контролю енергоспоживання ресиверів на шахтах; [4] – розробка моделей для оцінки ефективності енергоспоживання на залізорудних підприємствах; [5] – розробка моделей для визначення вхідних параметрів алгоритму керування процесом електропостачання/споживання залізорудними підприємствами; [6] – розробка маневрового керування споживанням електроенергії приймачами дільничних підземних підстанцій шахт; [7] – дослідження щодо покращення якості електричної енергії у внутрішньошахтних електричних мережах; [8] – аналіз стохастичності в моделюванні системи постачання-споживання електричної енергії; [9] – розробка математичних прогнозних моделей систем постачання-споживання електричної енергії; [10] – дослідження щодо переводу внутрішньошахтних електричних мереж на підвищенні рівні напруг.

Апробація результатів досліджень. Основні наукові положення, наукові та практичні результати дисертаційної роботи доповідались, обговорювались та отримали позитивні відгуки на наступних наукових зібраннях:

– Міжнародній науково-технічній конференції «Розвиток промисловості та суспільства» (Криворізький національний університет, м. Кривий Ріг, 2023, 2024, 2025, 2026 рр.);

– Міжнародній науково-практичній конференції «Інформатика. Культура. Техніка» (Одеська політехніка м. Одеса, НУ «Одеська політехніка», 2025 р.).

Публікації. Основні матеріали досліджень дисертаційної роботи висвітлені в 14 наукових працях, в тому числі в 1-й монографії, виданій в закордонному виданні англійською мовою, в 2-х статтях у періодичних виданнях України, які внесені до міжнародної науково-метричної бази даних Scopus, в 2-х наукових фахових виданнях України та 9 – у матеріалах конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна роботи складається зі вступу, 4 розділів, списку використаних джерел і додатків. Загальний обсяг дисертації становить 216 сторінок, з яких основний зміст викладений на 173 сторінках друкованого тексту, містить 76 рисунків, 28 таблиць. Список використаних джерел складається зі 177 найменувань. Додатки містять додаткові матеріали, що доповнюють основну частину дисертаційної роботи і поглиблюють рівень сприйняття отриманих результатів роботи, список публікацій за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації.

РОЗДІЛ 1

СТАН, НЕОБХІДНІСТЬ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ШЛЯХІВ ПОДАЛЬШОГО ПІДВИЩЕННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ВИДОБУТКУ ЗАЛІЗНОЇ РУДИ В УМОВАХ ПІДЗЕМНИХ ГІРНИЧОРУДНИХ ПІДПРИЄМСТВ (ШАХТ, РУДНИКІВ)*

1.1 Стан та проблеми гірничорудної промисловості України та місце в цьому електроенергетичної складової процесу видобутку залізної руди

Посідаючи гідне місце серед інших держав світу у видобутку залізної руди (Додаток А), Україна забезпечує себе завдяки експорту цього виду корисних копалин та їх похідних – чорних металів, значним рівнем наповненості ВВП та поповнення державних валютних запасів [16, 17].

Виробництво чорних металів в Україні за 2022-2026 роки значно постраждало через військові дії та знищення інфраструктури.

Щодо видобутку залізної руди в Україні, то цей процес базується на підземному (шахти, рудники) і відкритому (кар'єри) способі з подальшим процесом збагачення залізорудної сировини на збагачувальних фабриках. Станом на 2026 рік в обсягах видобутку ЗРС домінував другий із вищезазначених способів, але з вищезгаданого року в зв'язку з відомими політичними обставинами тенденція в перспективі видобутку змінилася [16, 17]. Для цього в сучасному баченні перспектив цього способу видобутку ЗР є ряд об'єктивних факторів [41, 42]. В переліку таких факторів є два системоутворюючі: відсутність державної необхідності в продовженні раніше існуючих обсягів видобутку залізної руди та значна енергоємність видобутку і, що особливо – подальшої переробки ЗРС при відкритому способі, котра, як приклад, при виготовленні залізорудного концентрату становить 38-45 кВт·год/т, а для котунів – 62-63 кВт·год/т.

* Аналіз наукових досліджень з аналізуємої тематики виконано в додатку Г (том 2).

Стосовно видобутку ЗР підземним (шахтним) способом, то тут показник енергоємності у загальному комплексі собівартості не перевищує 15 % без необхідності її подальшого збагачення. В умовах сучасного стану енергетики в Україні, та світі в цілому, останній показник постає вирішальним при виборі способу видобутку ЗР [30, 31].

Значимим доповненням до цієї тези є те, що глибини видобутку ЗР у видобувних регіонах досягли критичних, з точки зору проєктних глибин 650-700 м для відкритого способу видобутку, коли технологічно, згідно тих же проєктів, потрібно переходити на комбінований: кар'єрно-шахтний спосіб видобутку, або на відокремлений шахтний спосіб [32, 33].

В Україні станом на 01.01.2026 року підземним способом ЗР видобувалась у м. Кривому Розі, Дніпропетровської обл. (10-ть шахт) . Існуючі та перспективні технологічні показники функціонування ряду з цих шахт наведені в Додатку А.

Та все ж, в існуючому форматі технологій видобутку залізної руди, характерним є зниження (збільшення) з часом функціонування підприємств глибин видобутку. Разом зі зниженням рівня ведення гірничих робіт погіршуються техніко-економічні показники видобутку ЗР, збільшення часу для підготовки нових видобувних горизонтів, зростання енергоємності видобутку. До цих неопозитивних прогнозів додамо ще хронічний негативний факт маркетингу вітчизняних залізрудних підприємств – непрогнозовані в довгостроковому часі очікувані обсяги видобутку залізної руди.

За останнє десятиріччя базовий економічний показник – собівартість видобутку залізної руди зросла по всіх без винятку вітчизняних залізрудних підприємствах. Зокрема, на шахті 8 – на 38,5 %, на шахтах 2-7 – на 41,1 %, на шахтах 2-3 – на 28,9 %. На жаль, ця тенденція зберігається і на сьогодні. На період кінця 2021 року ці показники додатково зросли й опосереднено досягли 36,2 %.

Аналізуючи рамочно складові собівартості видобутої ЗР зазначимо, що рівень собівартості на всіх без винятку вітчизняних підприємствах із

підземним способом видобутку корисних копалин має прямий зв'язок з обсягами споживаної електричної енергії [39, 43].

Більше того, домінуючою складовою в темпах зростання собівартості ЗР, що видобувається, є електроенергетична [43].

За останні п'ять років частка електроенерговитрат при видобутку однієї тонни сирової руди підземним способом збільшилася на 21 % з перспективою подальшого зростання [43].

При цьому природний факт пониження з часом функціонування гірничорудних підприємств глибини видобутку на кожні 70 м (рівень покрокового технологічного пониження видобувних горизонтів залізрудних шахт) потребує додаткових витрат ЕЕ – 1100 кВт на 1 т видобутої ЗР до глибин 1500 м, а до глибин 2300 м – ще, відповідно, на 2400 кВт [37, 38].

Щорічно в масштабах функціонування сучасних залізрудних шахт України цей приріст, згідно даного факту, сягає більш ніж 1 кВт·год. на 1 т ЗР [36]. Тобто, логічно, що процес пониження рівнів видобутку ЗР, поглинає, хоча з значним рівнем «щедрості», ті позитивні напрацювання в сегментах енергоефективності, котрі були досягнені на гірничорудних підприємствах шляхом запровадження тривіальних енергоорієнтованих локальних заходів [32-35].

Безумовно, в повній мірі, така ситуація визначається статусом гірничовидобувних підприємств як енергоємних видів виробництва. Саме ці види підприємств суттєво впливають на показники споживання електроенергії в Україні і диктують необхідність підтримуванні обсягів її виробництва на потрібному для нормального функціонування підприємств держави рівні. Проте, як свідчать факти, це не завжди так. Виробництво електроенергії в Україні за останні роки скоротилося до драматичних рівнів.

Така ситуація прямо, в своєму негативі, вплинула на роботу підприємств гірничорудної та металургійної галузі, які відносяться до видів підприємств з безперервним циклом функціонування. В свою чергу, в процесі споживання ЕЕ домінуюча роль належить технології видобутку КК, котра базово формує

перфектні варіанти будов структур комплексів: електропостачання – електроспоживання підземних залізрудних підприємств.

Цікавим є той факт, що технології видобутку ЗР підземним способом на гірничорудних підприємствах України практично ідентичні, або аутентичні – дуже близькі до цього, оскільки саме такий спосіб видобутку належить до найбільш консервативних із усіх відомих у більш ніж віковій практиці видобутку корисних копалин. Так, за останні 50 років істотних, або навіть малоістотних, змін у позитивний бік за напрямом підвищення ефективності видобутку ЗР в цих видах підприємств не відзначено. Це не дає змоги кардинально змінити існуючі – «некеровані» структури СЕП (Додаток Б), а також режими споживання електричної енергії приймачами підземних гірничорудних підприємств. Проте, резерви потенціалу підвищення електроенергоефективності залізрудних підприємств все ж є і вони містяться в самих електроенергетичних комплексах, а точніше в ряді сегментів їх структури [47].

При цьому зазначимо, що розробка нових варіантів структур СЕП, в т.ч. синергетичних варіантів з розподіленою генерацією не виключає, а навпаки доповнює необхідність вирішення «старих-існуючих» енергетичних проблем цих підприємств в тому числі підкреслює важливість та необхідність пошуку нових, ефективних, в тому числі і енергоефективних, варіантів систем керування процесами в структурах розбудови – модернізації СЕП споживачів, в тому числі, напругою живлення до 1000 В, котрі отримують живлення від ДПП як сегмента загальної електроенергетики залізрудних шахт.

Аналізуючи стан, як рівень функціонування технічного та технологічного експлуатуємих електроенергетичних систем, в структурах вітчизняних залізрудних підприємств з підземними способами видобутку ЗР, впевнено можна констатувати як факт – системоутворюючу відсутність «магнітів» для притягування інвестицій в конче необхідну для даних видів підприємств реструктуризацію та розбудову АСК комплексами: електропостачання- електроспоживання. В такій реалії першим «магнітом» в

процесі створення програми – проекту такого рішення повинно стати наукове підґрунтя - стартові позиції для розбудови реальних заходів з підвищення електроенергоєфективності залізорудних підприємств, а значить і їх економіки та економіки держави взагалі.

1.2 Прогнозне оцінювання стану та перспектив електроенергетики в структурі діючої технології типових вітчизняних залізорудних шахт

Приведений в попередньому розділі даного дослідження аналіз, в далеко не прискіпливому дослідницькому форматі, але з достатнім для сприйняттям змістом важливості електроенергетичної проблеми, та місце в ній гірничорудних підприємств, з баченням необхідності пошуку варіантів ефективних заходів в структурах електроенергетичних комплексів: електропостачання – електроспоживання цих видів гірничих виробництв, логічно та доцільно для загального сприйняття масштабів очікуємих рішень наповнити та підтвердити певною конкретикою. Це найбільш доступно зробити на прикладі конкретно діючої залізорудної шахти.

Структурно технологія функціонування СЕП аналізованої шахти, як типової, наведена на рис. 1.1.

Проаналізуємо фактичні узагальнені статистичні дані, отримані автором в ході експериментальних досліджень на шахті № 1 Криворізького залізорудного басейну (Додаток В) рис. 1.2.

Окрім того, як встановлено згідно результатів аналізу, на основі зазначеної статистичної інформації щодо електроенергія (активна кВт·год.); витрати (середньодобові кВт·год.); фактична потужність (кВт); електроенергія (реактивна квар·год.); видобуток руди (в середньому за рік, т), встановлено, а точніше підтверджено прикладом, як факт, що взаємозв'язок між середньодобовими витратами ЕЕ та видобутком ЗР відсутній. Такий висновок зроблено на основі розрахунку коефіцієнта кореляції (табл. 1.1).

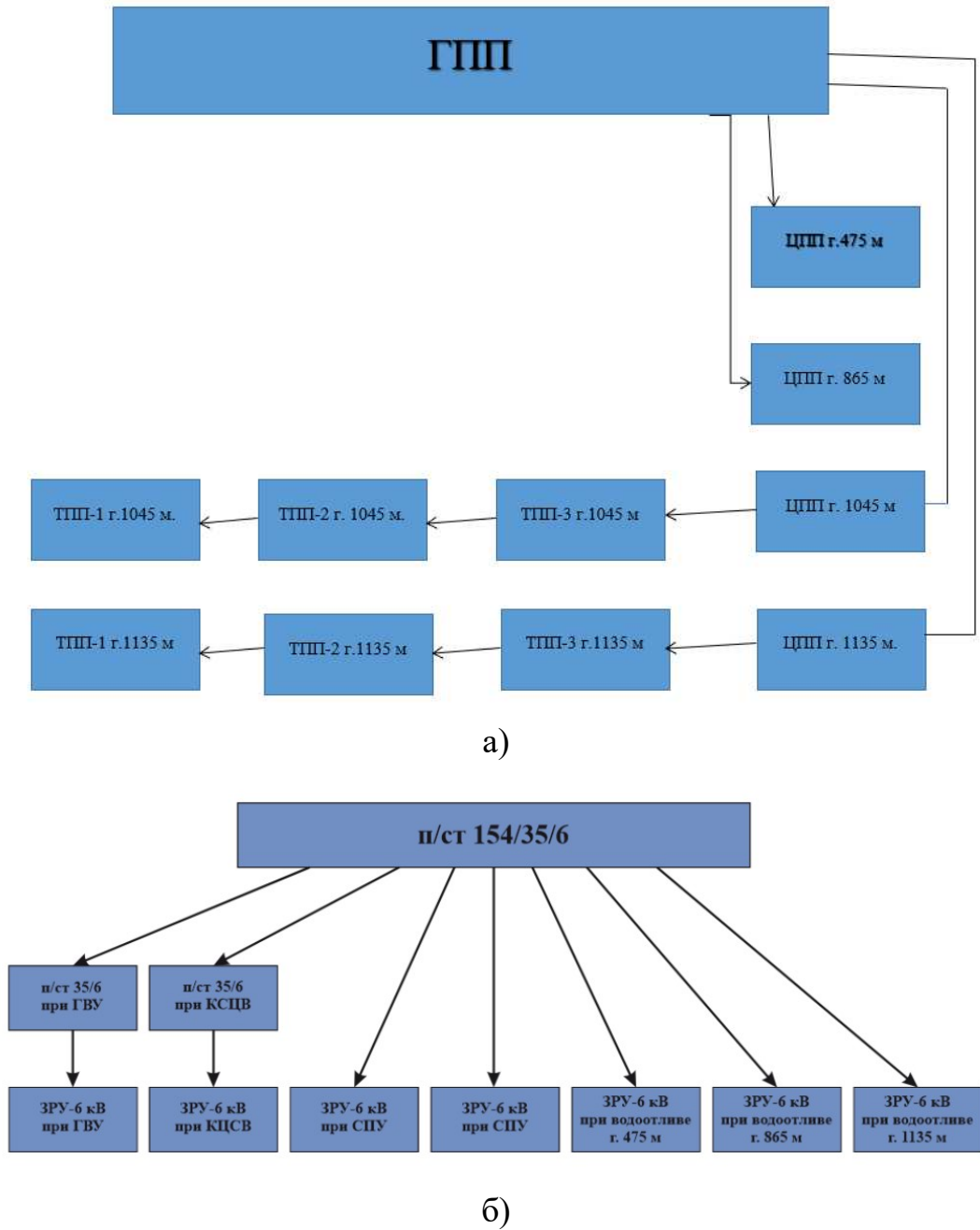


Рисунок 1.1 – Структура системи електропостачання (а) та її деталізація (б) залізорудної шахти № 1 Криворізького залізорудного басейну на період 2024 року

Таблиця 1.1 – Значення коефіцієнтів кореляції між показниками середньодобових витрат ЕЕ та видобутком ЗР

Роки	Коефіцієнти кореляції
2009	0,09
2010	-0,35
2011	-0,46
2022	-0,30
2024	0,48

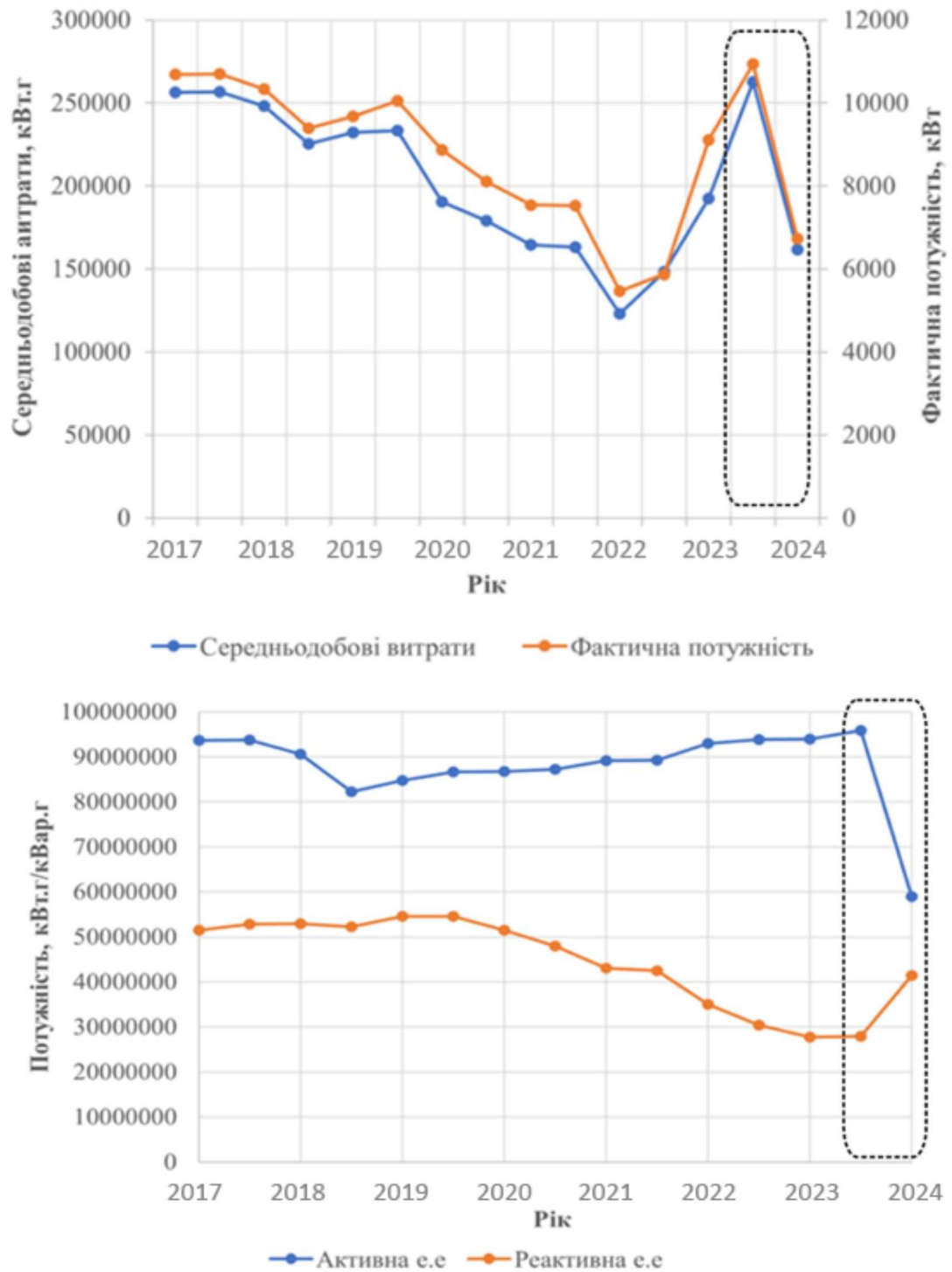
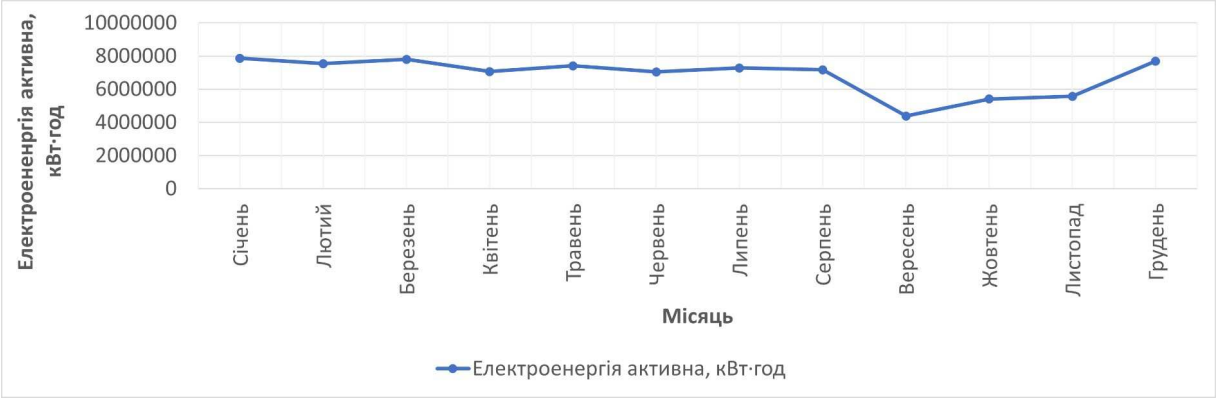
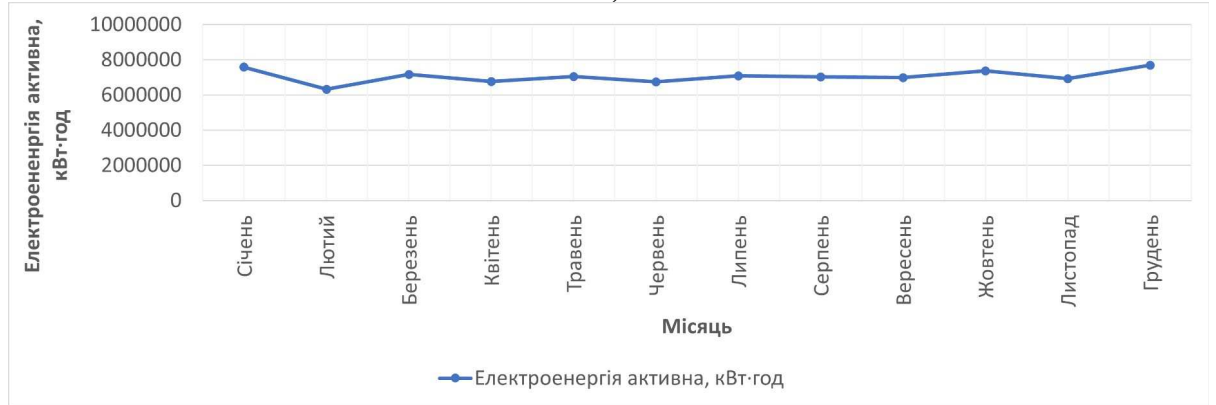


Рисунок 1.2 – Технологічні та електроенергетичні показники роботи шахти 1 Криворізького залізорудного басейну

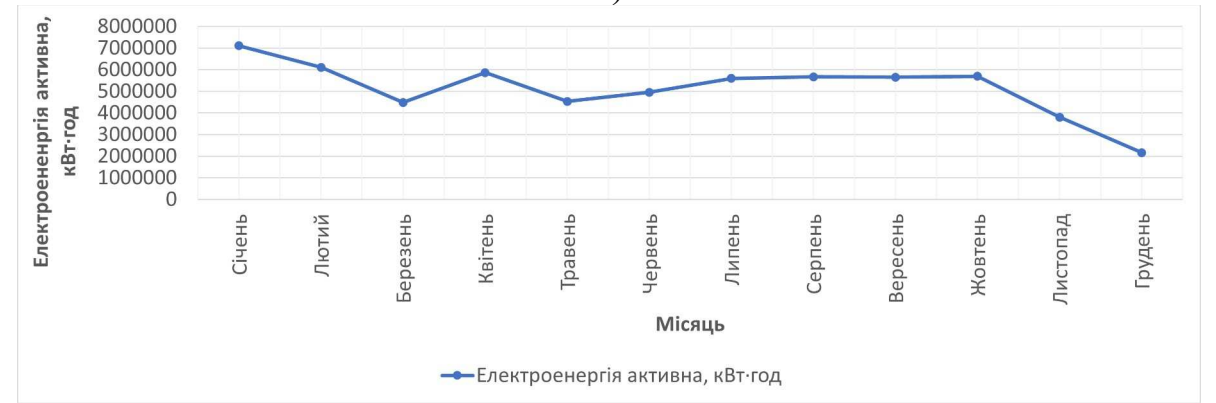
На рис. 1.3-1.4 та в Додатку В представлено окремі фрагменти споживання електроенергії приймачами з напругою живлення до 1000В ДПП ряду підземних горизонтів та залізорудних шахт Криворізького залізорудного басейну.



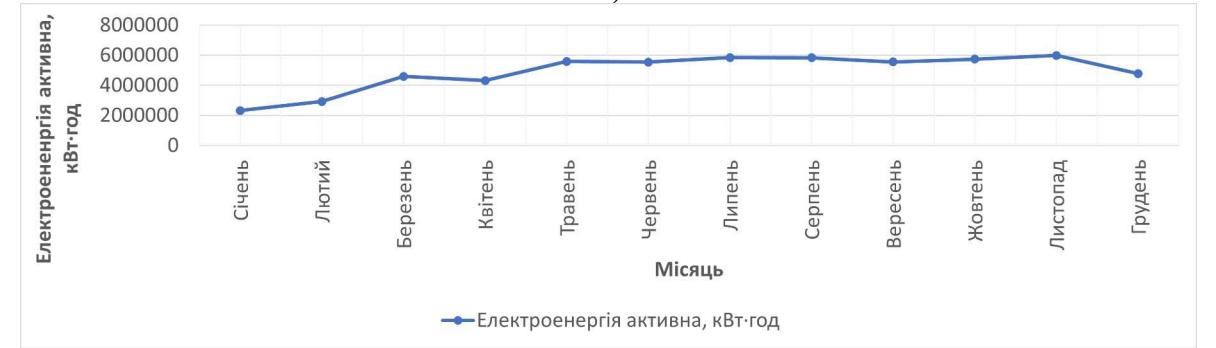
а)



б)



в)



г)

Рисунок 1.3 – Еволюція рівнів загального щомісячного споживання активної електроенергії приймачами ДПП до 1000В: а) 2021 р.; б) 2022 р.; в) 2023 р. г) 2024 р.

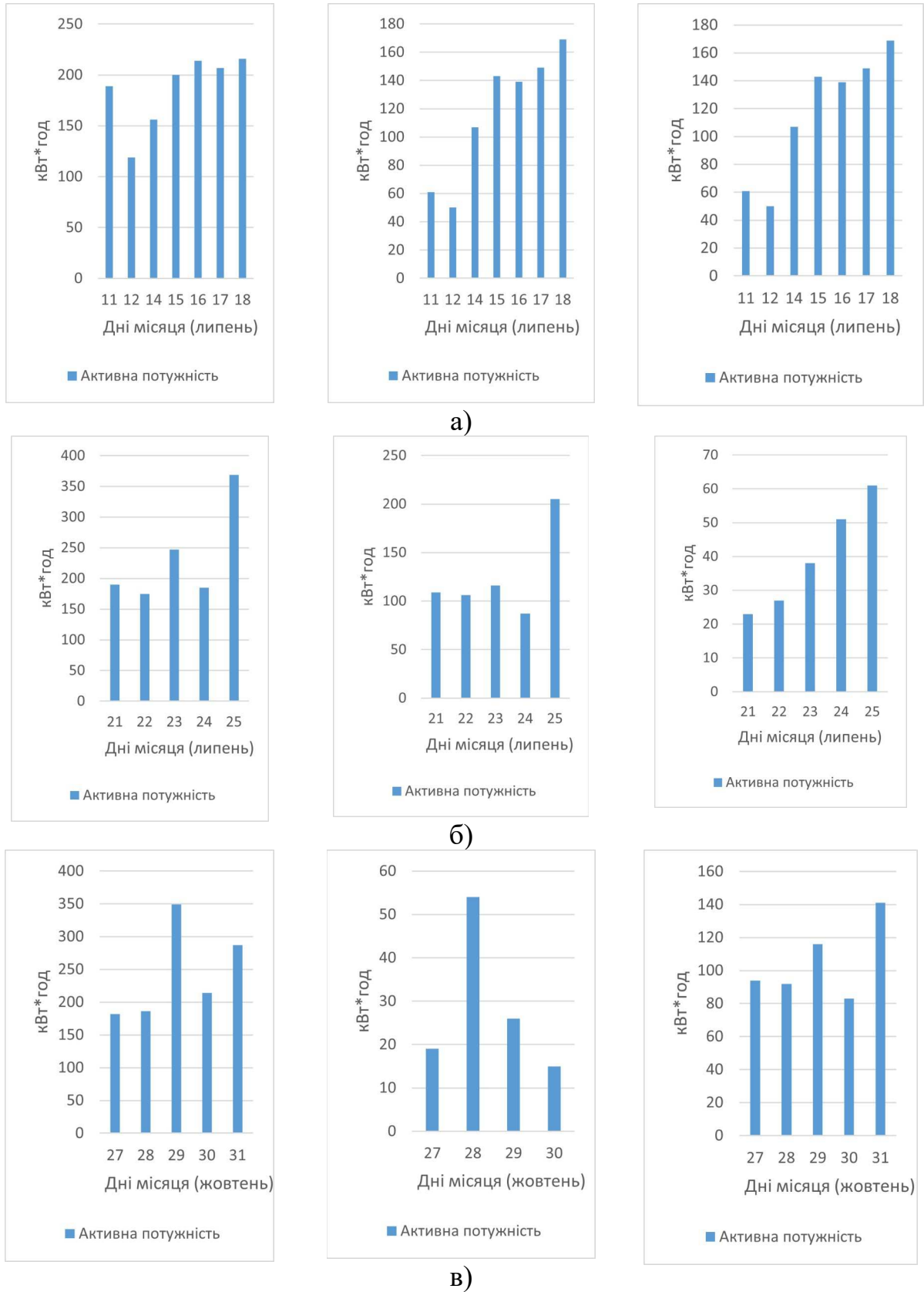


Рисунок 1.4 – Еволюція рівнів загального погодинного споживання активної електроенергії приймачами ДПП з напругою живлення до 1000В: а) ввод №3 ДДП шахти №9; а) ввод №5 ДДП шахти №9; а) ввод №10 ДДП шахти №9

Для певного порівняння на рис. 1.5 наведено дані по узагальненому споживанні ЕЕ в годинах доби в цілому по шахті. Вочевидь, що виходячи з візуального аналізу рис. 1.3 – 1.5, підтверджується факт стохастичності режимів споживання ЕЕ як взагалі по шахті, так і приймачами з напругою до живлення до 1000В. Тобто в формуванні стохастичності режиму споживання ЕЕ в цілому по залізорудній шахті є, зокрема, активна складова, котра доповнює та наповнює цей формат – підземні приймачі з напругою живлення до 1000В.

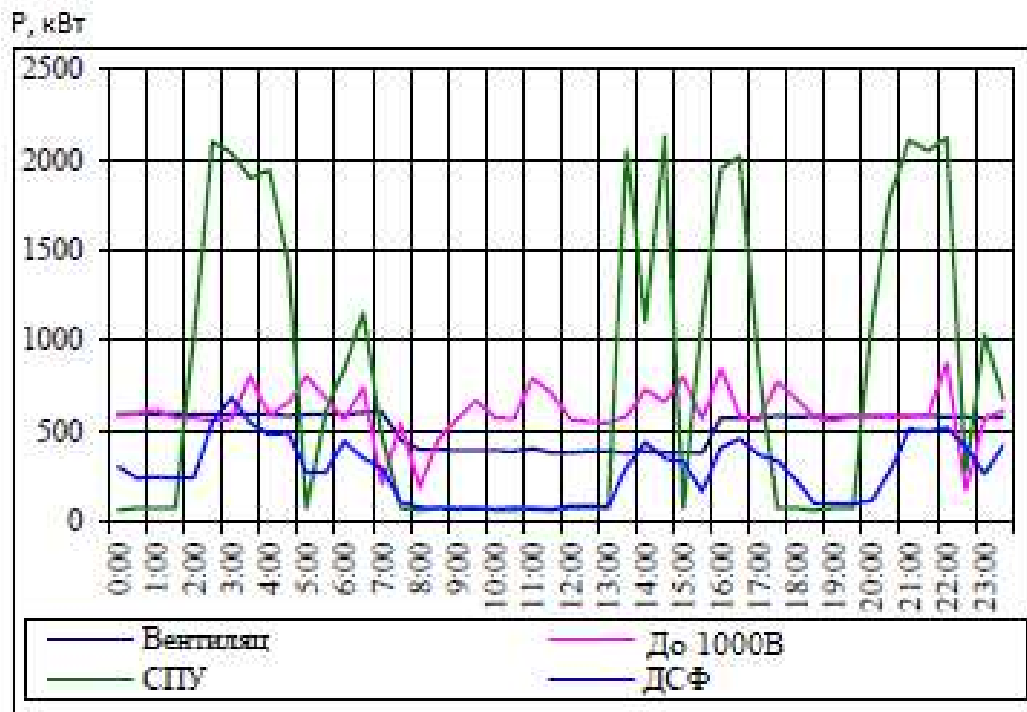


Рисунок 1.5 – Узагальнене споживання ЕЕ в годинах доби в цілому по шахті

Проведений попередній аналіз дає підстави щодо доцільності побудови альтернативних прогнозних значень витрат ЕЕ (рис. 1.6, табл. 1.2).

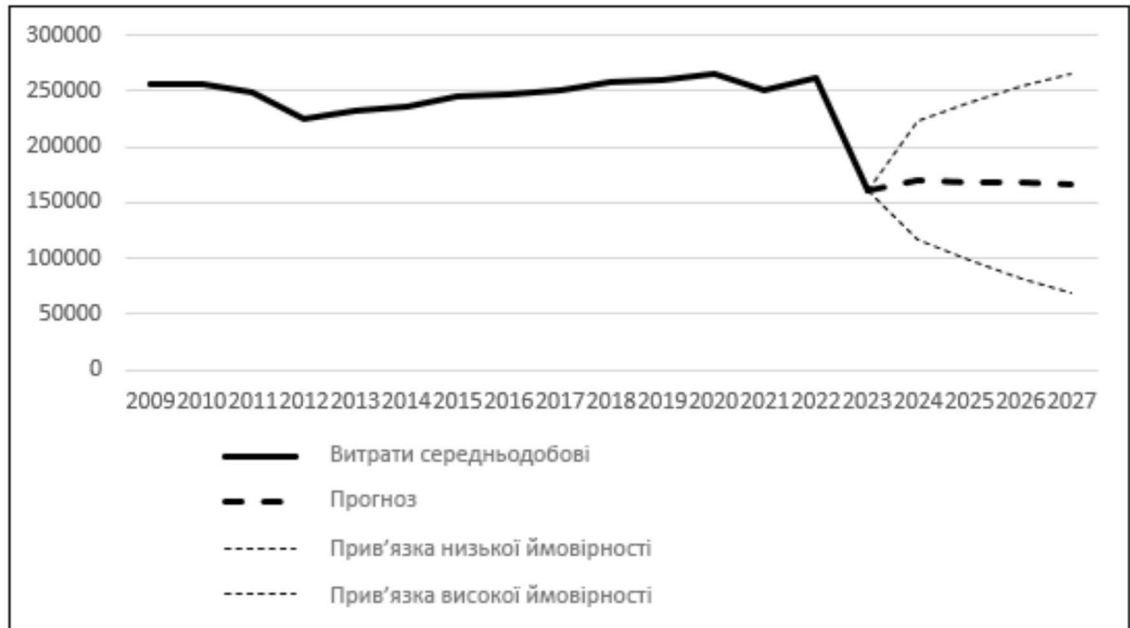


Рисунок 1.6 – Прогноз на період 2024 – 2027 рр. середньодобового споживання електроенергії за даними 2009 – 2023 рр.

Візуалізація отриманих результатів, дає підстави стверджувати про поступову зміну значень коефіцієнтів кореляції. Так, 2009 рік характеризується відсутністю такого зв'язку, а проміжок 2010 р. – 2022 р. має зворотній кореляційний зв'язок, тобто збільшення споживання ЕЕ призводить до зменшення видобутку ЗР. В свою чергу, 2023 р. наближає значення коефіцієнта кореляції до прямого значущого, тобто зростання споживання ЕЕ призводить до зростання видобутку ЗР.

Підставою для отримання більш ретельного результату є необхідність візуалізація трендової залежності (рис. 1.7). Такий вид аналітичної залежності виражається поліномом третього ступеню і має відповідне визначення:

$$Y = -298,64 x^3 + 6735,4 x^2 - 4142x + 305740. \quad (1.1)$$

Коефіцієнт детермінації в деякому випадку дорівнює 66,6 %, що свідчить про адекватність побудованої трендової залежності.

Таблиця 1.2 – Прогнози середньодобових витрат ЕЕ

Часова шкала	Витрати середньодобові	Прогноз (витрати середньодобові)	Прив'язка низької ймовірності (витрати середньодобові)	Прив'язка високої ймовірності (витрати середньодобові)
2009	256484,0712			
2010	256769,5918			
2011	248147,8055			
2012	225448,4685			
2013	232124,0603			
2014	235435,4			
2015	245643,2			
2016	246784,4			
2017	250983,2			
2018	258769,6			
2019	259876,7			
2020	264536,9			
2021	250978,6			
2022	262584,6329			
2023	161596,726	161596,726	161596,73	161596,73
2024		170234,4644	117284,75	223184,17
2025		169002,4408	97730,46	240274,42
2026		167770,4171	81975,46	253565,37
2027		166538,3935	68319,69	264757,09

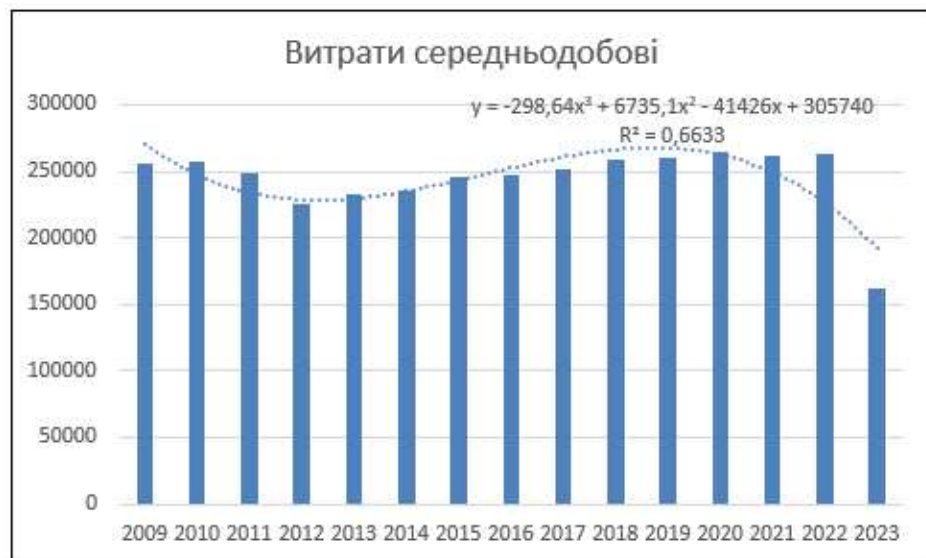


Рисунок 1.7 – Значення середньодобових витрат електроенергії по рокам

Відповідно другий альтернативний прогноз (рис 1.8, табл. 1.3).

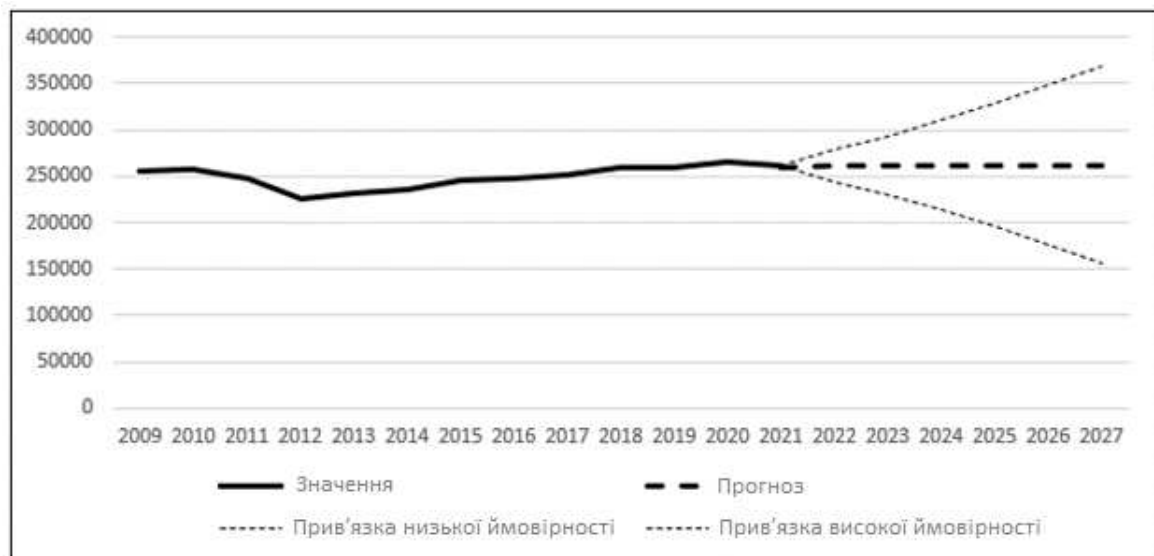


Рисунок 1.8 – Прогноз на період 2024 – 2027 рр. середньодобового споживання електроенергії за даними 2009 –2021 рр.

Таблиця 1.3 – Прогнози середньодобових витрат ЕЕ

Часова шкала	Витрати середньодобові	Прогноз (витрати середньодобові)	Прив'язка низької ймовірності (витрати середньодобові)	Прив'язка високої ймовірності (витрати середньодобові)
2009	256484,0712			
2010	256769,5918			
2011	248147,8055			
2012	225448,4685			
2013	232124,0603			
2014	235435,4			
2015	245643,2			
2016	246784,4			
2017	250983,2			
2018	258769,6			
2019	259876,7			
2020	264536,9			
2021	260978,6	260978,6	260978,60	260978,60
2022		261241,29	243160,21	279322,36
2023		261488,79	228937,78	294039,79
2024		261736,29	213135,43	310337,15
2025		261983,79	195672,69	328294,90
2026		262231,3	176629,12	347833,47
2027		262478,8	156099,45	368858,14

Відповідно на основі цих даних можна отримати трендову складову з оцінювання стану та розробки логістики розбудови заходів щодо підвищення електроенергетичних показників конкретного гірничого підприємства з рівнянням тренду в наступному аналітичному виразі:

$$Y = 576x^2 - 6775,6x + 259850. \quad (1.2)$$

З відповідним коефіцієнтом детермінації – 60,6 %, що достатньо для висновку про адекватність.

1.3 Обґрунтування варіативних перспектив підвищення режимних показників функціонування електроенергетичного комплексу: електропостачання - електроспоживання залізрудних шахт. Формулювання завдань наукового пошуку

Як зазначалось в попередніх розділах, та у відповідності до експериментальних досліджень автора та результатів аналізу наукових пошуків попередніх пошукачів аналізуемого спрямування (Додаток Г), існуючий пошуковий формат в більшості своїй базувався на локальних заходах, де об'єктом досліджень були споживачі ЕЕ з напругою живлення до 1000В та, для порівняння, узагальнені обсяги конкретного того, чи іншого підземного гірничорудного підприємства. Тобто, по факту це були «міні рішення». В логіці розбудови дорожньої карти досягнення мети з кінцевим рішенням – підвищення електроенергоефективності підприємства в цілому, такий варіант можливий, але лише як підваріант для кінцевого рішення. Тобто, кліше «мінірішень», як стартовий, варіант з перспективою об'єднання досягнутих локальних рішень в єдиний комплекс – «мегарішення», для централізованого управління вищезгаданим комплексом має право на існування і буде являти собою яскравий маркер на тлі загальної економіки даних видів підприємств.

При цьому «топами» таких локальних рішень мають бути рішення, котрі спрямовані та спроможні структуруватись в кінцевий комплексний формат - АСК комплексу: електропостачання - електроспоживання підприємства з

базуванням на сучасні вбачання ефективних варіантів СЕП та їх оптимальних економікоенергетичних параметрів функціонування (Додаток Д).

Тривіальним буде зауваження, що рівень досяжності того, чи іншого результату, в умовах існуючих технологій видобутку ЗР буде залежати від ефективності тих, чи інших заходів в тому числі при їх об'єднанні в єдиний управлінський комплекс.

При цьому немалий рівень впливу на кінцевий результат, окрім логістики проведення пошуку, будуть мати і стартові позиції – для якого формату СЕП та яких їх параметрів ми ведемо пошуки.

Проте, в будь - якому форматі рішень, їх філософія, в кінцевому варіанті, може сягати трьох результатів:

- збільшення рівня електроефективності;
- заморозити на існуючих рівнях, не даючи можливості зростання показників електроенергоефективності;
- стримання динаміки процесу зростання електроенергоефективності.

Перший з вищезазначених результат безумовно найбільш привабливий, але найменш реалізуємий в реаліях існуючих технологій видобутку руди. Таким чином, як би це не виглядало недостатнім в рівні своєї досяжності, але реальними залишаються два останніх варіанти.

Логічно, що такий складний у форматі комплексності рішення процес як пошук ефективних варіантів підвищення енергоефективності процесу підземного способу видобутку залізної руди, як і будь-який інший науковий пошук подібного формату, логічно розпочати із певних системоутворюючих кроків – бази для подальшого розширення кордонів кінцевих рішень. Стосовно проблеми, що аналізується, то це пошук формату енергоефективних параметрів функціонування електроенергетичних комплексів: електропостачання – електроспоживання даних видів підприємств з відповідними управлінськими діями з боку системи АСК цим комплексом.

Відносно формату базової структури електроенергетики гірничо-видобувних підприємств, а, точніше, її сприйняття як вищезгаданого

комплексу, зазначимо як факт, котрий впливає на результат кінцевого пошуку вже на перших сходинках цього пошукового процесу і який є певною перепоною, котра поки що не дозволила досягти позитивного результату в необхідному рівні для оцінювання його (результату) як достатньо ефективного, то в певному сенсі «гальмом» у реалізації такого підходу є ряд апріорно ефективних розробок заходів із підвищення енергоефективності з видобутку залізної руди є те, що ряд дослідників у своїх пошукових форматах не розглядали проблему системно, коли б енергетика підприємств – електроенергетичного комплексу визначалась би поєднаною формулою: електропостачання – електроспоживання.

Дроблення вищезазначеного комплексу для ведення процесу досліджень на складові: електропостачання та електроспоживання не може дати і не дасть у подальшому в такому форматі позитивного і потенційно можливого і досяжного рівня рішення.

Нажаль, для форматизації шляхів пошуку енергоефективності залізрудних підприємств узагальнюючих і чітко формалізованих критеріїв ефективності систем електропостачання та електроспоживання залізрудних шахт не існує. Разом з тим, базовими можуть бути прийняті наступні при умові цілісності отримання кінцевого результату:

- формування і розгляд шляхів вирішення проблеми підвищення енергоефективності електроенергетичних систем залізрудних підприємств у сфері аналізу та пошуку рішень у єдиній промисловій структурі комплексу: електропостачання – електроспоживання;

- дотримання і відповідність відповідних ДСТУ, ПУЕ, ПТБ та інших нормативних документів;

- забезпечення надійності та безперебійності електропостачання приймачів електричної енергії;

- забезпечення потрібного рівня функціонування вищенаведеного електроенергетичного комплексу та відповідність нормам якості електричної енергії і, в тому числі, мінімізація втрат при її транспортуванні;
- автоматизована централізація управління з можливістю переходу на децентралізацію для оптимізації режимів споживання електричної енергії приймачами в аварійних та псевдоаварійних режимах;
- моніторинг рівнів споживання електричної енергії як груповими, так й індивідуальними електроприймачами;
- створення умов для працездатності й захистів, у т. ч. захисту гірників від ураження електричним струмом;
- пошук технічних можливостей зниження електроенерговитрат шляхом:
 - а) удосконалення технологічних процесів;
 - б) застосування більш сучасного електрообладнання та енергоощадливих технологічних машин і механізмів.

Аналізуючи вищенаведені критерії та залишаючи для практичної реалізації ряд тривіальних заходів, котрі необхідні як складові для формату загальної формули підвищення енергоефективності електроенергетичних комплексів: електропостачання – електроспоживання залізорудних шахт, зупинимось на базових, котрі потребують наукового обґрунтування і відповідних рішень з висот наукового пошуку.

Провівши для цього «зріз» шляхів вирішення проблеми з диференціювання по складових енергоефективності гірничо-видобувних підприємств, то «анатомія» цього процесу буде наступною.

Дієвим базовим і водночас найсучаснішим заходом з когорти енергоефективних спрямувань розбудови існуючих як недостатньо ефективних структур в енергоефективні СЕП залізорудних підприємств є зміна структур СЕП в сучасному баченні можливостей та очікуваних

результатів з підвищення їх енергоефективності, а, значить, і всього електроенергетичного комплексу залізорудних підприємств.

Проте, не виходячи за межі реальних можливостей гірничорудних підприємств в умовах сьогодення, зазначимо, що такий мега-формат рішення за «один підхід» складно реалізуємий.

Як реальний вихід в такій ситуації може бути «квантування» процесу розробки заходів з підвищення електроенергоефективності з кінцевим варіантом створення єдиної системи керування електроенергетичним комплексом підприємства на певні складові цього комплексу. При цьому, треба чітко відокремлювати рівень самостійності цих складових та необхідність їх цільової інтеграції в загальну структуру «АСК електропостачання – електроспоживання».

У зв'язку з цим **метою досліджень** є теоретичне обґрунтування та розробка формату системи енергоефективного керування процесом споживання електроенергії приймачами з напругою живлення до 1000 В систем електропостачання залізорудних шахт з урахуванням умов технологічної невизначеності в часі режимів їх роботи.

У дослідженні розроблено структуру еквіполентування критеріїв та розробки відповідної системи з послідовним створенням АСК керування процесом розподілу електричної енергії між споживачами з напругою живлення до 1000 В і вирішувалися наступні наукові завдання:

- на основі обробки статистичної інформації за тривалий час виявити закономірності зміни у часі гірничо-геологічних і технологічних чинників на вітчизняних залізорудних шахтах, що визначають рівень їх електроспоживання;

- провести статистичний аналіз основних показників і особливостей електроспоживання на залізорудних шахтах і виявити закономірності, що характеризують зв'язок рівнів електроспоживання з основними гірничо-геологічними і технологічними факторами;

- виявити закономірності формування основних показників, що характеризують рівні електроспоживання та засоби передачі електроенергії підземних шахтних систем електропостачання і дати рекомендації з ефективного використання електричної енергії.
- розробити методологію і провести дослідження з оцінки стану та моделювання статистично неординарних режимів електричних навантажень електроприймачів гірничих підприємств;
- розробити методологію оцінки і моделювання, що дозволяє здійснити ефективний прогноз рівнів електроспоживання залізрудних підприємств з підземними способами видобутку залізрудної сировини, неповноти інформації та малої інформативності спостережуваних ознак, що обумовлюють режими електроспоживання.

1.4 Висновки до розділу 1

1. Проблема необхідності підвищення ефективності функціонування існуючого електроенергетичного комплексу: електропостачання-електроспоживання, що ідентично зменшенню енергоємності видобутку залізної руди в умовах діючих залізрудних шахт являє собою як загальногалузеве значення так і вагомий важіль для економіки України взагалі. Зниження обсягів використання електричної енергії в умовах існуючих технологій підземного способу видобутку залізної руди, котрі характеризуються постійним, з часом функціонування підприємств, збільшенням глибин видобутку, є необхідним, але не реально реалізуємим на практиці з цього приводу процесом.

2. Реально ефективним способом досягнення енергоефективності залізрудних підприємств є розробка і впровадження у практику роботи цих видів підприємств узагальнених систем керування електроенергетичним комплексом на платформі «АСК електропостачання-електроспоживання» з включенням в цю структуру всіх технологічних складових зазначеного

комплексу в тому числі споживачів дільничних підстанцій з напругою живлення до 1000В. При цьому, одним із превентивних, базових та системостворюючих стартових рішень в процесі потенціалу розбудови «АСК електропостачання-електроспоживання» підземних залізрудних підприємств доцільно переведення електричних систем на підвищені рівні електричної напруги: 10 кВ – замість 6,0 кВ та 0,6 кВ – замість 0,4 кВ.

3. Режими споживання електричної енергії споживачами з напругою живлення до 1000 В (0,4 кВ) в умовах залізрудних шахт носять стохастично неоднорідний і непрогнозований у часі характер, що є системоутворюючою рисою, котра доповнює і наповнює весь процес споживання електроенергії підприємством із відповідним негативним впливом на загальний рівень ефективності функціонування аналізованого електроенергетичного комплексу даних видів підприємств та їх електроекономічних показників шляхом реалізації розбудови та алгоритму ефективного функціонування «АСК електропостачання-електроспоживання» превентивно необхідним заходом потрібно стати визначення режимів роботи кожних з видів приймачів, в тому числі з напругою живлення до 1000 В, та їх вплив на загальні режими споживання електроенергії залізрудною шахтою з оцінюванням вхідних стартових параметрів для отримання адекватних кінцевих управлінських рішень в керуючому комплексі АСК.

РОЗДІЛ 2

АНАЛІЗ СТАНУ ТА СПРЯМУВАНЬ ПО ФОРМАТУ ЕНЕРГООРІЄНТОВАНИХ РЕЖИМІВ ПОСТАЧАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ В УМОВАХ ЗАЛІЗОРУДНИХ ШАХТ

2.1 Аналітика варіативності розбудови експлуатуємих та перспективних систем електропостачання вітчизняних залізрудних шахт

Як зазначалось в попередніх розділах даного дослідження варіанти структур СЕП підземних залізрудних підприємств формуються згідно формату технологічних систем розробки та видобутку ЗР, котрі застосовуються на конкретному гірничовидобувному підприємстві. Оцінюючи в узагальненому виді існуючі системи видобутку ЗР слід зазначити їх як незначну, так і все ж існуючу різницю.

Так, тільки в такому цілісному та комплексному промисловому регіоні як Криворізький залізрудний басейн гірничорудні підприємства якого видобувають більше 85 % від усього загальнодержавного обсягу видобутку ЗР, підприємства з підземними способами видобутку даного виду КК – шахти (рудники) не мають єдиної уніфікованої системи розробки та видобутку руди.

На 11-ти функціонуючих в Україні підземних виробництв з видобутку ЗР використовуються:

- система підповерхового обвалення зі скреперною доставкою та акумуляцією руди;
- система підповерхового обвалення зі скреперною доставкою (шахти);
- система підповерхового обвалення з відбивання руди глибокими сведловинами в затиснутому середовищі;
- камерна система розробки з закладанням виробленого простору.

Згідно вищевикладених систем підземного способу видобутку ЗР і формуються відповідні структури СЕП даних видів підприємств.

Проте, незважаючи на таке певне різноманіття систем підземних способів видобутку ЗР розподіл складових відсоток споживання ЕЕ між споживачами різниться не значно [95, 149, 152]. На рис. 2.1 наведено упосереднене розподілення рівнів споживання ЕЕ між споживачами вітчизняних залізрудних шахт.

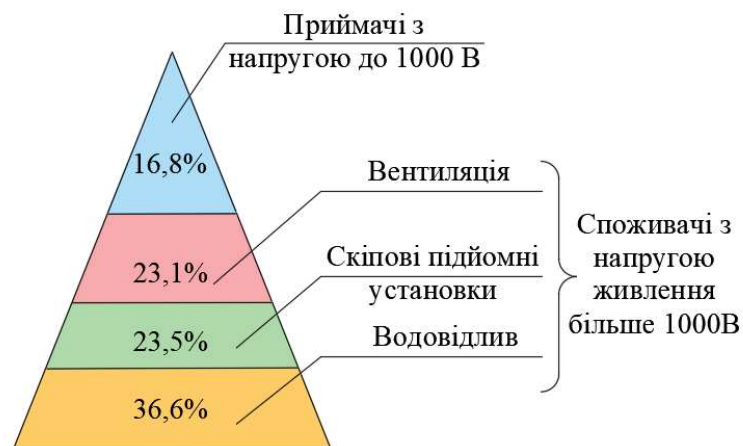


Рисунок 2.1 – Упосереднений за 2020-2026 роки розподіл рівнів споживання електричної енергії між споживачами при підземному (шахтному) способі видобутку залізної руди

При цьому, зазначимо, що близько 60 % всієї ЕЕ, котру споживає залізрудна шахта припадає на чисто підземне виробництво [149, 152].

Враховуючи, в тому числі вищевикладені аргументи, та незважаючи на певні індивідуальні особливості, технологічні формати існуючих структур СЕП в умовах залізрудних шахт являють собою достатньо узагальнені системоутворюючі базові риси.

Структурно підземні СЕП залізрудних шахт складаються із трансформаторних і розподільних підстанцій, кабельних ліній електропередач напругою до і вище 1000 В та відповідної комутаційної та захисної апаратури.

При цьому, загальна СЕП (надземна та підземна) даних видів підприємств отримує живлення мінімум як від 2-х незалежних один від одного джерел живлення ЕЕ (рис. 2.2) (Додаток Б).

Рисунок 2.2 – Однолінійна схема внутрішнього електропостачання підземних споживачів електроенергії шахти № 4 м. Кривого Рогу (приклад)

У структурі такого формату СЕП розбудовуються і схеми розподільних пристроїв шахтних підстанцій, котрі структуруються з двох паралельно працюючих секцій збірних шин.

В останні роки на ряді підприємств в якості резервних джерел живлення СЕП використовується автономні джерела, в тому числі, працюючі на власних ПЕР [97-100]. В такому випадку СЕП змінює свою структуру і реструктуризується з варіанту централізованого живлення від зовнішніх генеруючих систем у варіант систем із розосередженою генерацією ЕЕ [144]. Таке спрямування в зміні формату СЕП вельми актуальне, достатньо економічне і забезпечує надійність та, що головне, живучість СЕП, в будь яких умовах їх функціонуванні, що конче потрібне в сучасному стані існування галузі. Саме за такими синергетичними варіантами структур СЕП майбутнє як в енергоефективному, так і безперебійному спрямуванні їх функціонування. А в реаліях сучасних розбудов та функціонування СЕП поки що варіанти структур із розосередженою генерацією ЕЕ чекають своєї черги на втілення в практику проектування та розбудови таких варіантів.

Внутрішні (існуючі) схеми електропостачання залізрудних шахт виглядають наступним чином (рис. 2.2): електрична енергія від районних (магістральних) мереж напругою 154/35 кВ поступає на головну понижувальну підстанцію, котра розташовується на поверхні шахти і в якій розташовуються понижуючі трансформатори, котрі перетворюють напругу, що підводиться, в рівень 6 кВ. Для живлення споживачів поверхового комплексу шахт ГПП трансформують напругу до і більше 1000 В. Розподільний пристрій на ГПП виконується, як правило, двосекційним. Від пристрою живляться високовольтні споживачі ЕЕ поверхні шахти. Віддаленість основних поверхневих споживачів ЕЕ залізрудних шахт від ГПП, як правило, не перевищує 250-500 м [145].

На шахтах Криворізького залізрудного басейну загальна встановлена потужність трансформаторів підземних понижуючих підстанцій 6/0,4 кВ з 200000 кВА [145].

Електропостачання підземних виробок залізрудних шахт здійснюється від ГПП з поверхні шахти напругою 6 кВ за допомогою кабелів, що прокладаються по шахтному стовбуру до центральної підземної підстанції, котра, чи котрі, розташовуються на підземному горизонті (горизонтах) в біля приствольного двору (рис. 2.2). Для живлення ЦПП по стовбуру шахти передбачається прокладка не менш двох паралельних кабелів. Якщо для передачі електричної потужності, потрібної для живлення споживачів ЦПП, двох кабелів недостатньо, то передбачається прокладка більшої кількості, але, як правило, парної кількості. Прокладка не парної кількості стовбурних кабелів не рекомендується й приймається тільки при наявності спеціальних технічних обґрунтувань. Прокладання такої кількості кабелів викликане обмеженням на максимальний переріз кабелю, який згідно цього показника може допускатись для прокладання по стовбуру шахти, а також прагнення забезпечити збільшення терміну використання та відповідну якість ЕЕ. Мінімальний перетин кабелю живлення, котрий прокладається по стовбуру шахти, складає 35 мм², максимальний – 150 мм² (табл. 2.1).

Таблиця 2.1 – Кількість кабелів напругою 6 кВ, що прокладені по стовбурах ряду залізрудних шахт Криворізького залізрудного басейну

№ з/п	Найменування шахти	Кількість кабелів, шт.	Переріз, мм ²
1	Шахта № 4	10	150
2	Шахта № 5	4	120
3	Шахта № 6	6	150
4	Шахта № 7	6	120
5	Шахта № 1	4	70
6	Шахта № 2	8	120
7	Шахта № 3	10	70
8	Шахта № 8	4	95

Протяжність шахтних стовбурних кабелів загалом визначаються глибиною залягання рудного тіла. Наразі гірничі роботи в залізрудних

шахтах України ведуться на підземних горизонтах з глибинами до 1500 м. Протяжність стовбурних кабелів при цьому сягає 1500-2000 м.

Середня протяжність шахтних кабельних ЛЕП 6 кВ, що транспортується розподільними мережами по одному підземному горизонту, складає близько 12-15 км і визначається технологією проведення гірничих робіт, розміром шахтного поля тощо (рис. 2.2). Збільшення глибин видобутку тягне за собою збільшення довжин кабелів. З переходом з вищого горизонту на нижчий загальна протяжність кабельних ЛЕП збільшується в середньому на 200-300 м.

Незалежно від схеми живлення ЦПП, від місця її розташування на тому чи іншому підземному горизонті, кожна така підстанція складається з одного або двох РП із напругою 6 кВ двох трансформаторів напругою 6/0,4 кВ для живлення електроприймачів, що розташовуються в приствольному дворі і розподільного пристрою нижчої напруги.

Для забезпечення надійності та відповідної експлуатаційної оперативності в ЦПП передбачається роздільна робота вводів, секціонування системи шин РУ 6 кВ та роздільна робота трансформаторів. Пристрої, що складаються із декількох робочих або резервних агрегатів (насоси головного водовідливу, трансформатори розташовані в ЦПП тощо), повинні приєднуватися до різних секцій шин. При такій схемі живлення вихід із ладу однієї із секцій шин 6 кВ не потягне за собою простою шахти в цілому.

Кількість ЦПП визначається кількістю підземних горизонтів, що розробляються в структурі проекту шахти й рівнями електричних навантажень, споживачів ЕЕ цих горизонтів.

На залізорудних шахтах Криворізького залізорудного басейну очисна виїмки – видобуток ЗР, розосереджено, як правило, на 2-4-х робочих підземних горизонтах. Живлення ЕЕ декількох ЦПП розраховується в залежності від схеми підземного електропостачання. При значній електричній потужності підземних споживачів, що визначає значну кількість необхідних стовбурних кабелів, живлення декількох ЦПП здійснюється відповідно більш складно.

Як зазначалось попереду, частина електроенергії, яка надходить до шин РП ЦПГІ напругою 6 кВ, розподіляється між підземними ДПП для живлення підготовчих робіт та робіт щодо видобутку ЗР. Друга частина електроенергії також напругою 6 кВ трансформується для живлення споживачів, котрі розташовані в підземному приствольному дворі та електропристроїв напругою до 1000 В, що дислокуються в районі цих виробок (Додаток Б).

Від розподільних мереж 6 кВ ЕЕ живляться дільничні підземні підстанції, від котрих, в свою чергу, здійснюється розподіл електричної енергії по підземним видобувним та нарізним виробкам шахт (рис. 2.3). ДПП існують як в варіантах стаціонарних, так і пересувних підстанцій. Переваги споруд стаціонарних ДПП, котрі розташовуються в камерах з вогнетривким кріпленням, пояснюється особливістю залягання родовищ руд и технологією ведення гірничих робіт, при яких роботи по видобутку ЗР і підготовчих роботах, як правило децентралізуються й проводяться одночасно на декількох підземних ділянках – ортах, блоках та горизонтах. В процесі видобутку ЗР споживачі ЕЕ підземних ділянок-блоків переміщуються, в основному, у вертикальній площині, що виключає можливість переміщення ДПП по мірі просування гірничих робіт у межах поверху. Це передбачає тривале, незмінне місце знаходження підстанцій з установкою двох, або більше комплектних розподільних пристроїв й двох, або більше, трансформаторів потужності 250-400 кВА, груповим комплектом розподільних пристроїв напругою 6 кВ типу КРУРН-6 і дистанційно керованим пристроєм типу ШРДУ2-380.

Цікавим у такому ракурсі є й такий факт. Зниження ведення робіт у залізрудних шахтах призводить до збільшення встановлених потужностей силових трансформаторів ДПП. Так, наприклад, на горизонті 527 м шахти № 4 (м. Кривий Ріг) встановлена потужність трансформаторів склала 250 кВА, то на горизонті 1350 м ця потужність уже становить 970 кВА, тобто збільшилась майже вчетверо. Повна потужність трансформаторів усіх ДПП підземних горизонтів уже на тій же шахті у 2012 році склала 3,66 МВА, а в 2026-му – 4,22 МВА.

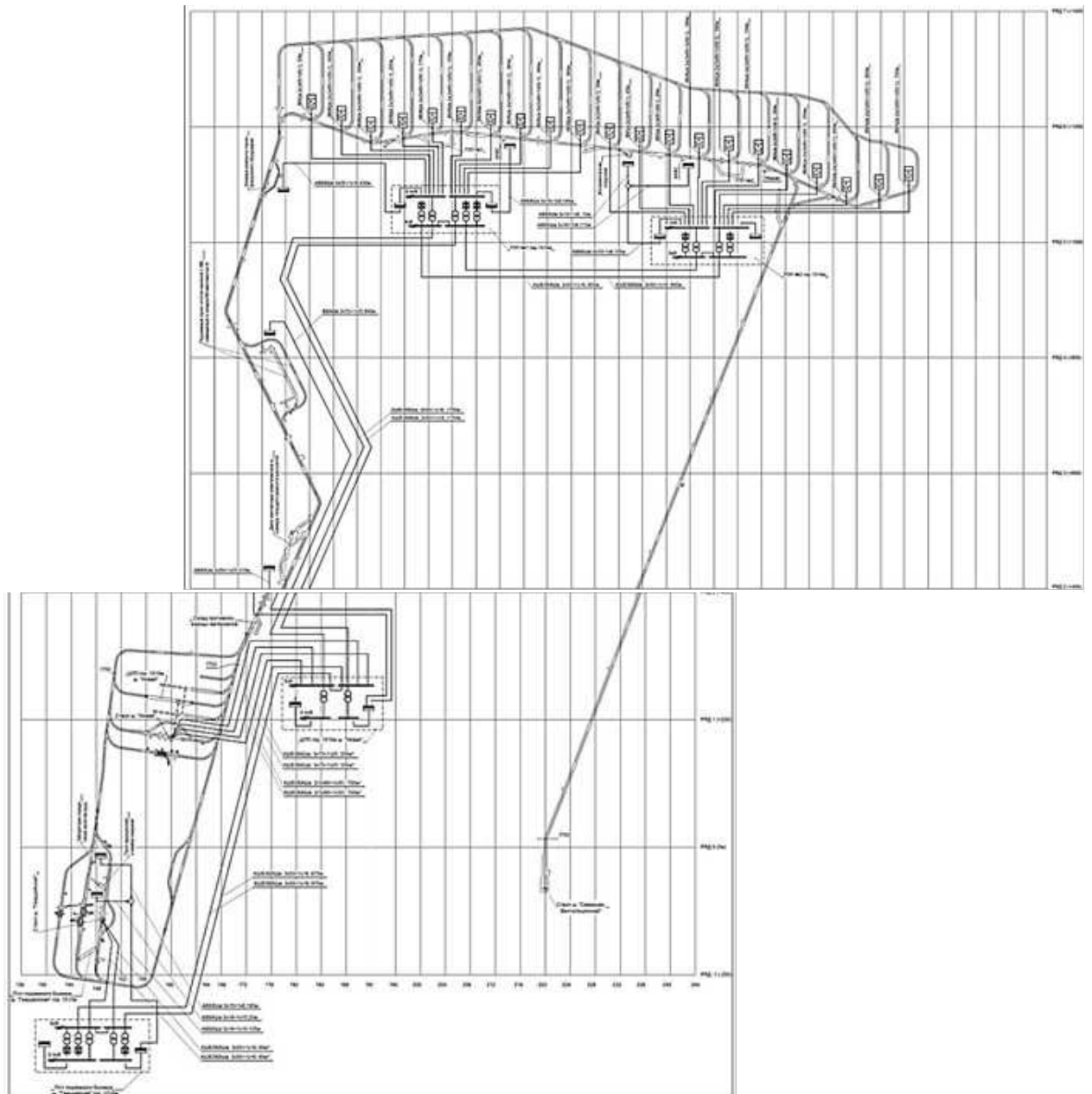


Рисунок 2.3 – Схема електропостачання підземних горизонтів шахти № 4
(м. Кривий Ріг)

Місцезнаходження ДПП й відстань від приймачів залежить від системи розробки та видобутку корисних копалин, кількості та розмірів блоків, що знаходяться в роботі, висоти підземних поверхів і підповерхів.

Схеми живлення ДПП структурно незначно різняться між собою, базуються на технології основних принципів їх побудови та незначно змінюються з часом (рис. 2.4 – 2.6).

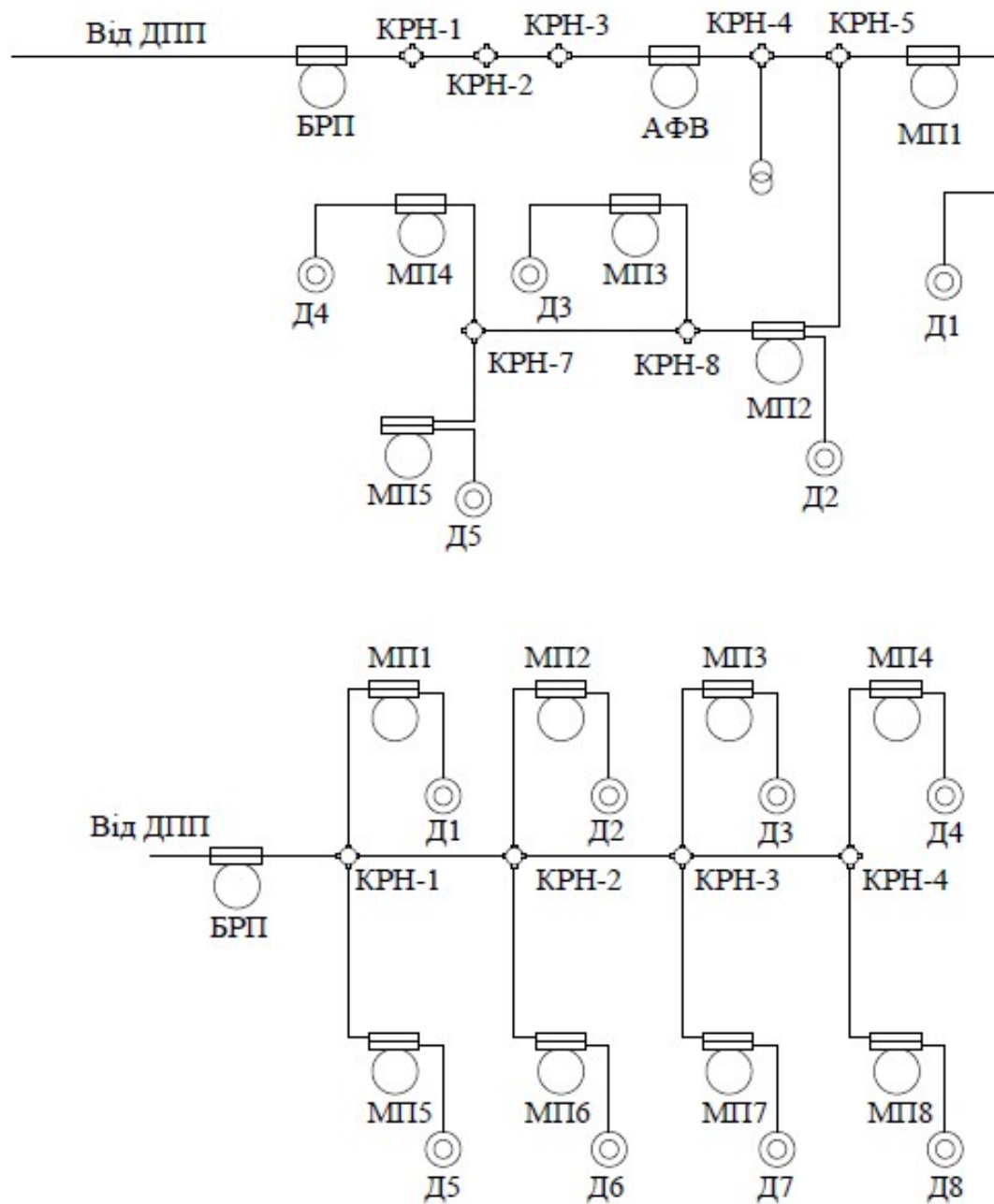


Рисунок 2.4 – Спрощена схема електропостачання приймачів електричної енергії з напругою живлення до 1000В дільниці підземних підстанцій шахти № 1 гор. 865 м (м. Кривий Ріг) станом на 1983 рік (з архівів НДР кафедри електричної інженерії Криворізького національного університету)

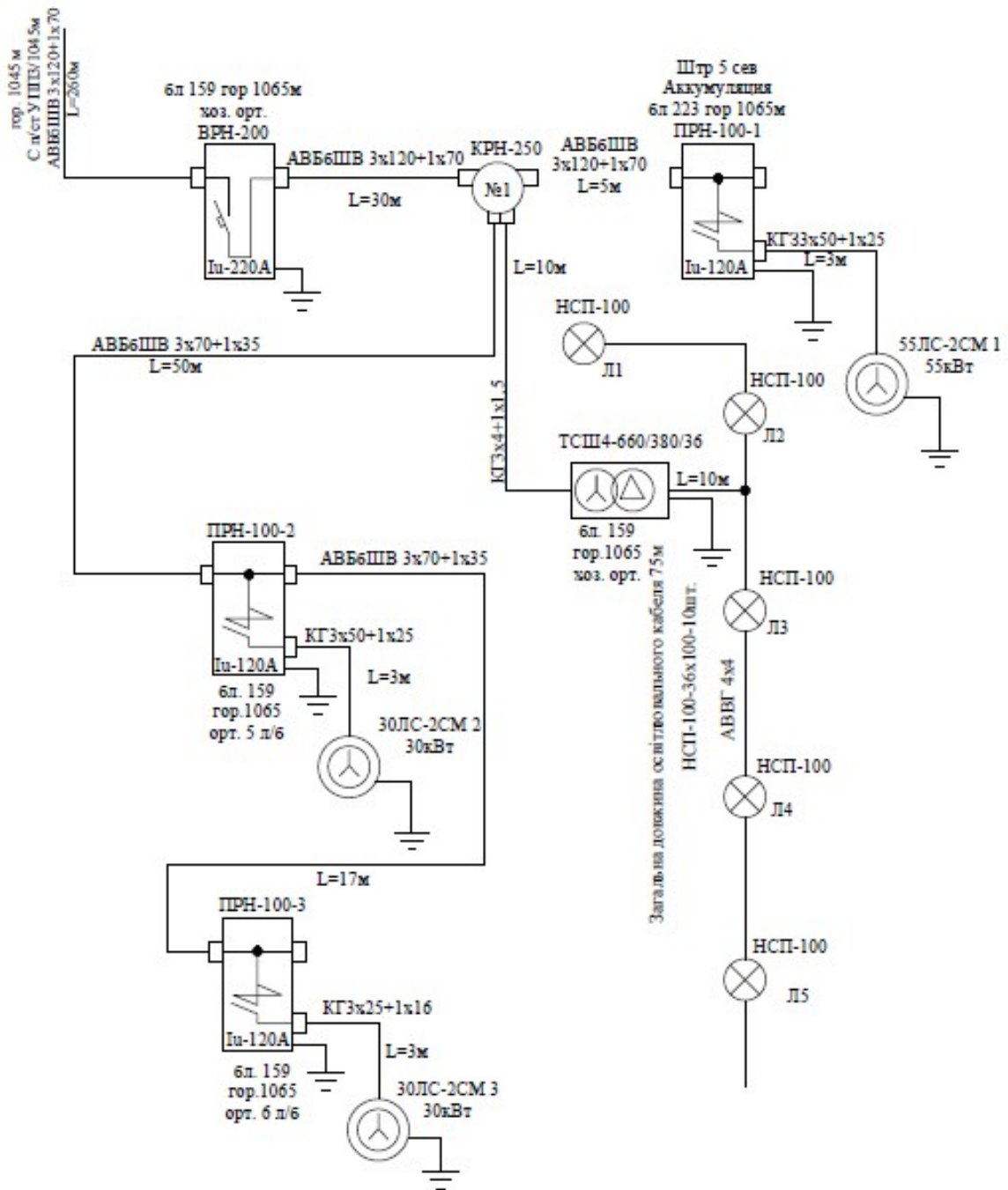


Рисунок 2.5 – Спрощена схема електропостачання приймачів електричної енергії з напругою живлення до 1000В видобувної ділянки шахти № 1 (м. Кривий Ріг) Бл. 159 гор. 1065 м штр. 5 (станом на 2026 рік).

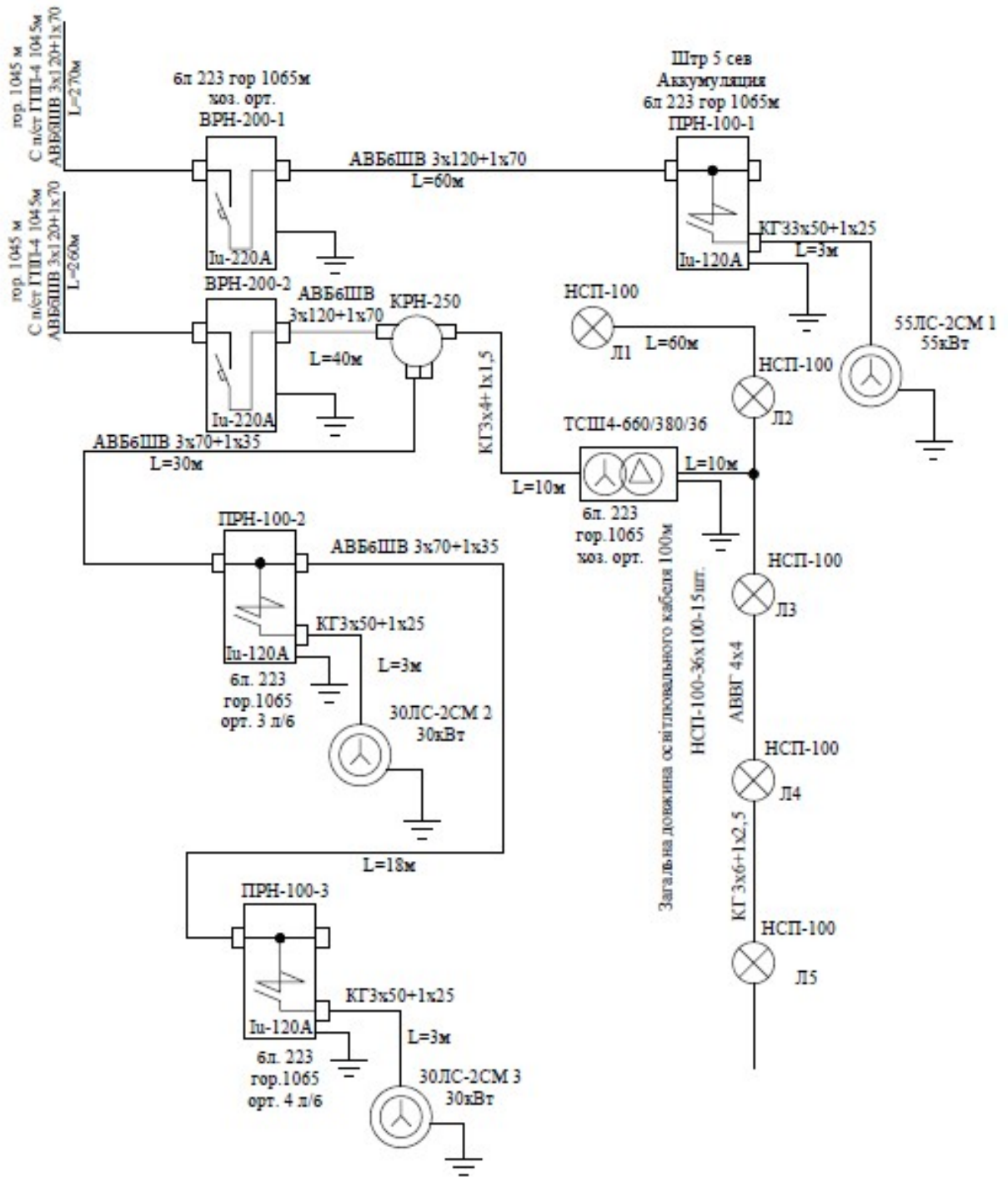


Рисунок 2.6 – Спрощена схема електропостачання приймачів електричної енергії з напругою живлення до 1000В видобувної ділянки шахти № 1 (м. Кривий Ріг) Бл. 223 гор. 1065 м штр. 5 (станом на 2026 рік)

Для прийому й розподілення ЕЕ напругою 6 кВ в більшості випадків використовується розташована в кінці головного відкаточного квершлягу по стику з польовими штреками тягова підстанція для живлення ЕЕ внутрішньошахтного транспорту електровозної відкатки ЗР, яка поєднується з однією із ДПП.

Облаштування таких підстанцій обумовлено значною протяжністю квершлягів й особливістю відпрацювання рудного поля. ДПП – живляться по радіальній, магістральній та кільцевій схемам. Слід відзначити, що розподілення електроенергії між ДПП, згідно варіанту кільцевої схеми, характерно для більшості рудників, тому що в такому випадку забезпечується найбільше резервування електропостачання гірничих робіт.

Для розподілення електроенергії від ДПП до БРП застосовується радіальна система електропостачання, що виконується броньованими, або гнучкими типами кабелів. В свою чергу електрична мережа до споживачів на гірничій ділянці (видобувній чи нарізній) – гнучкими кабелями, як правило типу ГРШ.

Електропостачання блока гірничої ділянки здійснюється від двох фідерів ДПП, що викликано необхідністю забезпечення роздільної роботи споживачів підповерху й основного горизонту, тому що пускова та комутаційна апаратура не має блокуючих реле витоку струму, а в умовах експлуатації та режимів роботи віброблоків основного горизонту призводить до частих хибних відключень мережі апаратурою захисту. ЕЕ з ДПП подається на БРП до якого підключається відповідне електрообладнання тієї, чи іншої гірничої ділянки.

Схеми електропостачання споживачів ланок від БРП також досить різноманітні та визначаються, знову таки способом підготовки штатного поля, системою розробки, параметрами обладнання, що застосовується, організацією ведення гірничих робіт тощо.

Характерною особливістю схем електропостачання залізорудних шахт, на відміну від вугільних є значна протяжність і розгалуженість електричних

мереж ланок напругою 0,4 кВ, витрати на монтаж та експлуатацію котрих вельми значні. Це пояснюється залежністю протяжності ланкових кабельних мереж від потужності покладу залізної руди та інших гірничо-геологічних факторів, а також кількості і потужності технологічного обладнання, що використовується. Електричні мережі з напругою 0,4 кВ значної протяжності в умовах підземних виробництв зі значною кількістю підключеного обладнання є ненадійним в експлуатації та мають значний матеріальний збиток, пов'язаний із нерідкими фактами простоїв, електрообладнання, що обумовлено виходом з ладу того чи іншого електрообладнання. Саме на ЛЕП 0,4 кВ, котрі живлять споживачів видобувних та нарізних ділянок, приходиться біля 80 % від всіх щорічних ушкоджень в загальній структурі СЕП залізрудних шахт [90-93]. До того ж протяжні мережі напруги 0,4 кВ являють собою потенційну небезпеку для обслуговуючого персоналу через наявність значних струмів витоку [90].

В реаліях практики експлуатації протяжність броньованих типів кабелів від ДПП до БРП змінюється межах від 150 до 700 м довжина гнучких кабелів від БРП до найбільш видаленого споживача складає 200-400 м, а довжина гнучких кабелів від БРП до найбільш видаленого споживача складає 200-400 м. Загальна довжина кабелів, що приходиться на один фідер змінюється в межах від 300 до 1000 м.

При значній потужності електроспоживачів та значної протяжності мереж, переріз останніх при напрузі 0,4 кВ розраховується через втрати напруги до трансформації ЕЕ до споживачів. Гранична протяжність кабельної мережі обмежується умовою забезпеченням надійного захисту реле струму від струмів короткого замикання.

СЕП гірничих підприємств повинні бути економічними, надійними та щодо їх експлуатації та обслуговування, а також забезпечувати безпечними безперебійність живлення споживачів ЕЕ, необхідну якість електроенергії як в штатних так і позаштатних режимах роботи.

Підводячи короткі підсумки до технічних показників функціонування кабельних ЛЕП 0,4 кВ від ДПП до БРП і далі до дільничних споживачів ЕЕ зазначимо, що будучи найбільш вразливими для пошкоджень різного ґатунку, вони потребують максимальної уваги до свого технічного стану і максимального планово попереджувального нагляду – моніторингу їх параметрів. Це потребує значних матеріальних затрат. Окрім того, щорічно в масштабі шахт Криворізького залізрудного басейну вводиться в експлуатацію в середньому 27-м ДПП сумісно з розподільчими мережами 0,4 кВ, на будівництво яких складають 4,3 - 6,6 млн. грн. на рік (в цінах 2019 року).

Як відзначалося раніше, станом на теперішній час технологічний процес при незмінності систем видобутку руди на залізрудних шахтах зазнає значних змін, котрі обумовлені, в першу чергу, переходом на глибокі горизонти.

При цьому очікувано, що в умовах функціонування залізрудних шахт з глибинами видобутку ЗР 1000–1800 м, витрати на електропостачання зростуть, у тому числі споживачів з напругою до 1000 В, котрі отримують живлення від ДПП, у більшій мірі, ніж продуктивність окремих горизонтів і шахт у цілому, тому що зростання рівнів електропостачання пов'язане, в першу чергу, зі збільшенням встановлених електричних потужностей приймачів ЕЕ та потужності СЕП. Це ставить питання оцінювання режимів роботи комплексу електропостачання – споживання електроенергії споживачами ДПП у ранг пріоритетних у процесі пошуків з досягнення мети даного наукового пошуку (Додаток Е).

2.2 Дослідження стану функціонування електроенергетичного комплексу: електропостачання – електроспоживання залізрудних шахт

Підвищення ефективності використання електроенергії у методологічному аспекті в умовах подальшого розвитку підземних гірничорудних виробництв диктує відстоювання розвитку формату теорії

перепрофілювання систем електропостачання до нових сучасних мов функціонування синтезованого електроенергетичного комплексу: електропостачання-електроспоживання [95, 99, 107, 108]. Для аналізу, як для першого кроку в розбудові нових варіантів, та оцінювання процесів в такому форматі (в таких форматах) електроенергетичного комплексу необхідна розробка нових наукових підходів та методів оцінювання стану, аналізу, моделювання і прогнозування всього процесу вище згадуваного процесу, в існуючих умовах невизначеності і неповноти інформації і, що головне, розробка в кінцевому варіанті АСК цим процесом.

Проте, що логічно, на старті такої «розбудови» потрібно визначитись з форматом вхідних параметрів як для оцінювання так і для керування цим непростим в режимі функціонування електроенергетичним комплексом.

У цьому зв'язку, та згідно меті наукових завдань дослідження даної дисертаційної роботи, доцільно провести оцінювати та вибрати для цього методи моделювання і прогнозування аналізованого процесу [146-154].

При розбудові дослідницької логістики треба враховувати, що пошук дієвих заходів щодо підвищення енергоефективності електроенергетичних комплексів гірничорудних підприємств з підземним способами видобутку ЗР, жорстко пов'язаний з проблемою рівня реальності в оцінюванні режимів споживання ЕЕ як відповідними споживачами, так і підприємством в цілому, і, що особливо актуально і необхідно, визначенням факторів та рейтингу їх впливу на цей процес специфіки технології ведення гірничих робіт на тім чи іншому підприємстві.

Для формування такого підґрунтя, щодо логіки дослідження, вважаємо за доцільне проведення активних експериментів в умовах діючих підприємств, що і було реалізовано в ході даного наукового пошуку.

Згідно аналізу результатів відомих досліджень та авторського бачення процесів, що аналізується, а також превентивних наукових пошуків, котрі будуть викладені в подальших матеріалах цього розділу, доцільними є наступні напрямки дослідження:

– споживання електроенергії підземних гірничих підприємств залежить від значної кількості факторів, впливу на процес електропостачання-електроспоживання який має складний і різноманітний характер, а опис в рамках як детерміністичних, так і класичних статистичних методів не завжди можливий через непередбачуваність умов, що визначають рівні їх впливу на функціонування приймачів і відповідно на процес споживання електричної енергії в цілому. Констатуємо, що рівні споживання ЕЕ залізрудних підприємств формуються під впливом чинників, тривіальне прогнозування дії яких не є достовірним. Понад те, значний за чисельністю і різноманітністю цих чинників ставить певні труднощі, щодо оцінювання ефекту рівня їхнього впливу на споживання ЕЕ як і в методологічному, так і у техніко-економічному аспектах;

– інформація про процес: електропостачання-електроспоживання підземних гірничорудних підприємств містить значну кількість емпіричних даних і характеризує його багатовимірним. Значна кількість таких ознак впливу робить завдання виявлення зав'язків між складними для вирішення. У цьому випадку вимагається опис процесу: електропостачання-електроспоживання якомога меншою кількістю узагальнених характеристик, які відображають внутрішні об'єктивно існуючі закономірності, що не піддаються безпосередньому спостереженню навіть в рамках активного експерименту;

– зазначені в процесі дослідження особливості склали підґрунтя щодо формування необхідності застосування в оцінюванні станів режимів: електропостачання-електроспоживання гірничих підприємств методів, котрі дозволяють отримувати рішення за умов неповної інформації у разі зниження розмірності вихідних даних про об'єкт дослідження. У цьому випадку виникають завдання аналізу даних про споживання електричної енергії вирішення котрих ґрунтується на використанні методів факторного аналізу та дослідженні типології об'єктів, що вивчаються;

– у зазначеному аспекті оцінка стану процесу електропостачання-електроспоживання при всьому різноманітті моделей аналізу спирається на положення, котре полягає в тому, що при обстеженні або експерименті, коли емпіричний матеріал містить велику кількість параметрів, значна кількість з яких об'єднується між собою кореляційними зв'язками. При цьому береться до уваги, що «зовнішні» параметри, що спостерігаються, лише побічно характеризують аналізуємий процес. Разом з тим важливо, що поряд із великим числом «зовнішніх» параметрів (факторів) існує системоутворююче число «внутрішніх» параметрів, які важко, чи навіть неможливо виміряти чи обчислити, але вони в значній мірі визначають поведінку «зовнішніх» параметрів. Знаходження цих гіпотетичних суттєвих параметрів та оцінювання рівнів їх впливу є метою аналізу стану процесу;

– такі параметри (фактори), гірничорудних підприємств, як глибина залягання рудного тіла, розміри родовищ, температура в підземних виробках, вид технології видобутку ЗР, параметри систем розробки та видобутку, типи машин і обладнання та інші, що застосовуються, впливають на рівень електроенергоємності продукції – ЗР. В свою чергу, впливовим є електроенергетичні фактори – структурні електричні параметри СЕП, кількість, встановлена потужність, ККД електроприймачів та ряд інших, що обумовлює узагальнене формування режимів електричних навантажень. Організаційні та експлуатаційні фактори зумовлюють ступінь використання тих чи інших електроприймачів і режимів їх функціонування як рівень підвищених втрат ЕЕ через погіршення характеристик електрообладнання, машин та механізмів. У цьому доцільно дослідити основні процедури оцінювання станів режимів електропостачання з урахуванням реальної експериментальної інформації.

На рис. 2.7 наведено загально методологічний підхід в авторському баченні щодо формату проведення дослідження процесу електроспоживання.



Рисунок 2.7 – Структурно-логічна схема дослідження процесу електропостачання – електроспоживання підземних залізорудних підприємств

Характеристика споживання електроенергії машинами, механізмами, установками відповідає певним режимам їх функціонування, витратою електроенергії на одиницю продукції видобутку ЗР. У зв'язку з існує доцільність встановити основні закономірності формування графіків ЕН (Додаток В) при дослідженні ЕС машинами, механізмами, установками.

Аналізуючи процеси споживання ЕЕ приймачами залізорудних шахт, на основі реальних експериментальних даних, для достатнього сприйняття необхідності та важливості цієї процедури в подальшій розбудові тактики досліджень потрібним вбачається формалізація всього споживчого електроенергетичного комплексу: електропостачання-електроспоживання з послідовним еквіполентуванням його по видам складових цього процесу.

На рис. 2.8 наведено опосереднений розподіл рівнів споживання ЕЕ між споживачами при підземному способі видобутку ЗР. Як свідчать дані рис. 2.8, окрім індивідуальних енергоємних споживачів ЕЕ (скіпові підйомні установки, водовідливний комплекс та головні вентиляційні установки) біля 20 % споживається ЕЕ підземними приймачами з напругою живлення до 1000 В. Проте для необхідного рівня розкриття стану потрібно знати та

оцінити реальні режими процесу споживання ЕЕ. Це стосується як загалом всіх приймачів ЕЕ, так і окремо енергоємних видів.



Рисунок 2.8 – Розподіл рівнів споживання електричної енергії між споживачами при підземному способі видобутку залізної руди

В свою чергу оцінювання режимів споживання ЕЕ приймачами даних підприємств повинно розглядатися як системостворююча складова вхідних параметрів для розбудови управлінського алгоритму керування цим процесом, котрий повинен бути синтезований для керування всім споживчим комплексом підприємства з диференційованим по кожному споживачеві з відповідної групи (рис. 2.8).

На рис. 2.9 наведені запозичені з відомих попередніх досліджень пошукувачів типові графіки споживання ЕЕ відповідних енергоємних споживачів, котрі базою розбудови тактики для управління. Як свідчать графіки рис. 2.9 рівні коливань характеризуються значним розмахом і носять стохастичний характер, що в черговий раз формує логічну необхідність керування цим процесом і, що доведено в відповідних роботах на всіх рівнях розбудови СЕП [149, 150, 155].

Проте, згідно окресленої мети даного наукового пошуку в подальшому будуть аналізуватись виключно електроенергетичні процеси в складових СЕП

– дільничних підземних підстанцій з напругою живлення до 1000 В залізорудних шахт. З цією метою для визначення реальних базових вихідних електроенергетичних параметрів ДПП було проєкспериментувано і оброблено ряд регістрограм добових графіків навантажень споживачів 0,4 кВ, котрі отримують живлення від трансформаторів 6/0,4 кВ ряду ДПП шахт (Додаток В).

Аналіз отриманих даних з оцінювання рівнів споживання ЕЕ даними видами споживачів дає підстави стверджувати, що процес споживання ЕЕ приймачами ДПП залізорудних шахт носить стохастичний характер, як і загальний процес споживання ЕЕ шахтою в цілому [153, 154]. Таким чином ретельне формалізоване опрацювання потребує більш поглиблених, системних, наукових інноваційний підходів та методів дослідження.

Для цього, як фрагмент «стартової» позиції на рис. 2.9 представлена більш детальна візуалізація споживачів й відповідна потужність ДПП–3 (секція 2) шахти №1 (м. Кривий Ріг).

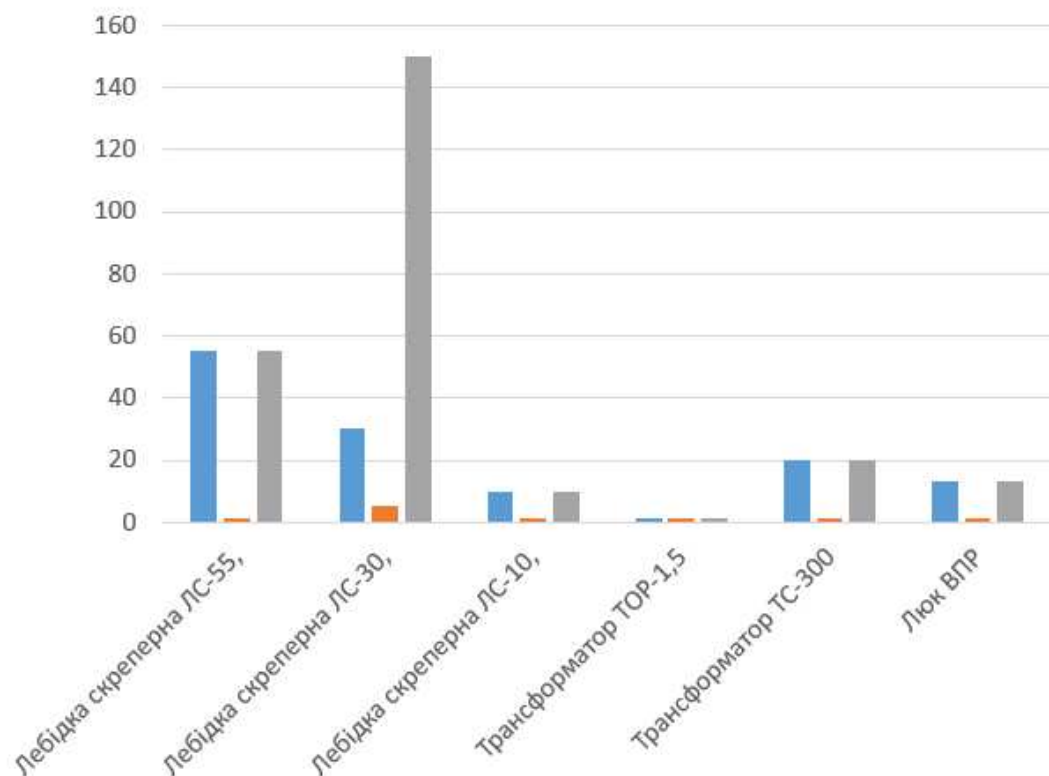


Рисунок 2.9 – Споживачі до 1000В ДПП – 3 (секція 2) шахти №1 (м. Кривий Ріг)

Відповідно для відслідкування динаміки процесу були розраховані середньодобове споживання і вартість електроенергії по рокам окремих типових залізрудних шахт (табл. 2.2).

Результати аналізу експериментальних досліджень режимів споживання ЕЕ приймачами зазначених підприємств свідчать про значні розбіжності в їх рівнях між тією та іншою шахтою [96, 146-149, 154-156].

Таблиця 2.2 - Середньодобове споживання і вартість електроенергії по рокам шахти Криворізького залізрудного басейну

№ з/п	Показники	Роки			
		2013	2018	2019	2024
1	Середньодобове споживання електроенергії, кВт·год	2302	2124	2405	1863
2	Середньодобова вартість електроенергії, грн.	1245	2016	2961	2664
3	Середньодобова питома вартість електроенергії, грн/кВт·год	0,541	0,949	1,231	1,430

Окрім цього, як свідчать всі ті ж отримані результати рівнів споживання ЕЕ споживачами ДПП як і всього електроенергетичного комплексу залізрудних шахт, носять різко коливальний характер [146] і формують електроенергетичні режими, які мають неоднорідний (з точки зору розподілу ймовірностей) характер. У цьому випадку розподіл ймовірностей значень ознак вихідної статистичної інформації та перетвореної (стислої) інформації про процеси в складових ЕЕС з напругою живлення до 1000В мають полімодальний характер. Ця обставина вносить певні труднощі, в процесі

необхідного для подальшого пошуку моделювання процесів в даній системі [174].

У разі неоднорідного енергетичного режиму роботи електроприймачів (при полімодальних розподілі значень електричного навантаження) моделювання процесу ЕЕС доцільно виконувати з виділенням з усієї області зміни навантаження стійких рівнів, близько середніх значень яких з певним ступенем розсіювання змінюються окремі випадкові значення навантаження.

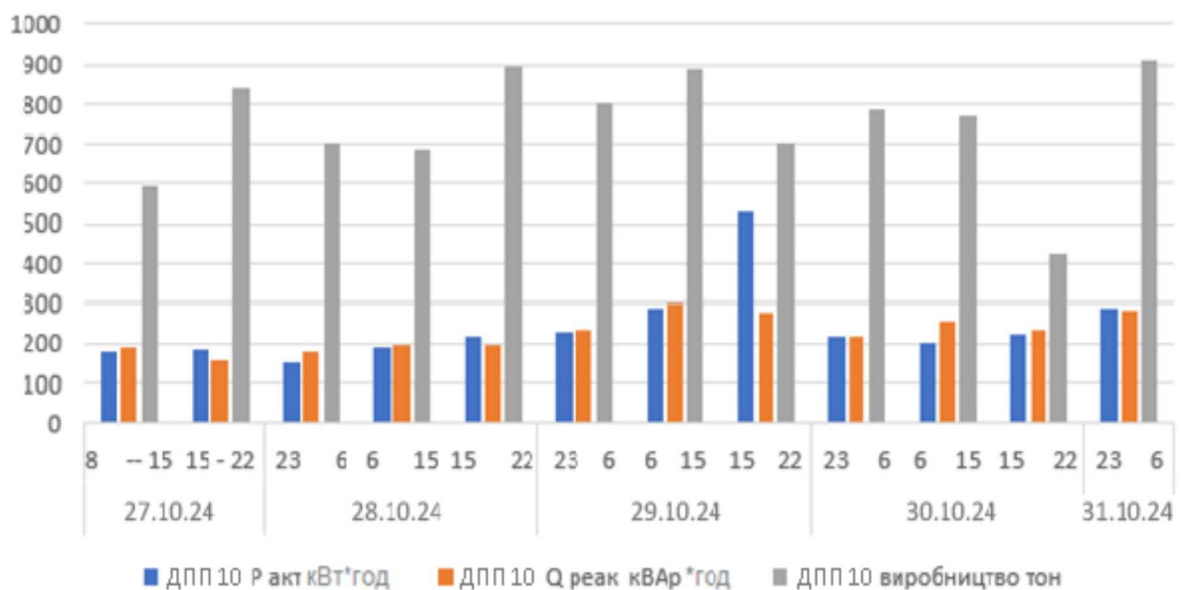


Рисунок 2.10 – Графіки добового споживання (31.01.2025) електричної енергії приймачами ДПП шахти №9 (м. Кривий Ріг)

З графіків рис. 2.9 – 2.10 вочевидь вплив технології функціонування споживачів на рівні споживання ЕЕ. В окремі інтервали часу реактивна потужність перевищує активну, що свідчить про перевантаження устаткування, правда короткочасно. Згідно з експериментальними даними груповий коефіцієнт використання в різних умовах змінюється в межах 0,1 – 0,2. У процесі експериментальних досліджень визначився також коефіцієнт потужності $\text{tg}\Psi$, який для різних ділянок змінювався в межах 0,8 – 0,9.

Аналіз показує, а точніше підтверджує висновки попередніх досліджень, що реальні рівні завантаження трансформаторів 6/0,4 кВ на ДПП становить менше 30 % встановлених електричних потужностей.

Це є результатом технології роботи відповідних приймачів ЕЕ до яких відносяться машини і механізми безпосередньо задіяні в видобутку ЗР та ті, котрі ведуть процес підготовки гірничих виробок, а також тягові підземні підстанції та ряд інших.

Саме ці споживачі, а точніше системи видобутку ЗР підприємств де вони експлуатуються, і формують режими їх роботи, а значить і рівні та характер споживання ними ЕЕ.

Характеризуючи, для розуміння логіки розбудови пошуку даного дослідження, зазначаємо, що в дійсний час, у залізорудних шахтах України застосовуються в основному системи розробки та видобутку ЗР де основним видом доставки руди є скреперна. Системи розробки з вібропуском застосовується значно рідше, проте рівні електроспоживання в цих системах менше, ніж при скреперній доставці. Тому на даному етапі роботи основну увагу приділимо дослідженню процесів електроспоживання дільничних споживачів ЕЕ котрі використовують скреперну доставку, оскільки цей основний сьогодні спосіб видобутку ЗР в шахтах (рудниках) найбільш енергоємний, а значить і увага до нього повинна бути першочерговою.

В практиці функціонування залізорудних шахт, як правило застосовуються скреперні лебідки з електроприводом на основі асинхронних електричних двигунів з к.з. ротором та напругою живлення 0,4 кВ потужністю від 10 до 100 кВт. Проте в переважній більшості випадків використовуються скреперні лебідки ЛС-30 потужністю 30 кВт. Ці види лебідок найбільшою мірою задовольняють умови ведення гірничих робіт, і широко застосовуються як на видобувних, так і на підготовчих підземних гірничих роботах.

Одночасно з роботами по видобутку ЗР в підземних гірничих блоках ведуться підготовчі роботи, проходяться («нарізаються») нові дільниці для скреплювання. На підготовчих дільницях для прибирання породи також

використовуються такі ж самі типи скреперних лебідок, кількість яких того ж порядку , що і на видобувних роботах, а в початковий період експлуатації блоку навіть більше.

Таблиця 2.3 – Споживачі ДПП – 3 шахти №1 (м. Кривий Ріг)

№ лінії	Що живить	Найменування споживачів	Потужність, кВт	Кількість, шт.	Сумарна потужність, кВт
Секція № 1					
2	Ділянка №12, Блок № 7	Лебідка скреперна ЛС-55, Лебідка скреперна ЛС-30, Лебідка скреперна ЛС-10, Трансформатор ТОР-1,5 Трансформатор ТС-300 Люк ВПР	55 30 10 1,5 20 13	1 5 1 1 1 1	55 150 10 1,5 20 13
		Всього			23.5
3	Блок №16 освітл. штрека	Люк ВПР Трансформатор ТОР-1,5	13 1,5	1 7	13 10,5
		Всього			23,5
		Всього по секції			273
Секція №2					
6	Блок №8	Люк ВПР Трансформатор ТОР-1,5 Вентилятор СВМ-6	13 1,5 14	1 1 1	13 1,5 14
		Всього			28.5
8	Ділянка №1 Блок №6	Лебідка скреперна ЛС-55, Лебідка скреперна ЛС-30, Лебідка скреперна ЛС-10, Трансформатор ТОР-1,5 Трансформатор ТС-300	55 30 10 1,5 20	1 3 2 1 1	55 90 20 1.5 20
		Всього			186,5
		Всього по секції №2			215

Таблиця 2.4 – Споживачі ДПП №10 шахти №2 (м. Кривий Ріг)

№ лінії	Що живить	Найменування споживачів	Потужність, кВт	Кількість, шт.	Сумарна потужність кВт
Секція №1					
6	Орт 213	Віброживильник	14	1	14
		ВПП Трансформатор ТОР-1,5	1,5	1	1,5
7	Орт 217	Віброживильник	14	1	14
		ВПП Лебідка ЛС-30	30	2	60
		Трансформатор ТСШ	4,5	1	4,5
		Трансформатор ТОР-1,5	1,5	1	1,5
		Всього по секції №1			95,5
Секція №2					
1	Орт 217	Лебідка ЛС-30	30	8	240
		Віброживильник ВПП	14	1	14
		Трансформатор	1,5	4	6
		ТОП-1,5	20	1	20
		Трансформатор ТС-300			
		Всього			280
1	Орт 205	Лебідка скреперна	30	10	300
		ЛС-30	14	1	14
		Віброживильник ВПП	1,5	3	4,5
		Трансформатор	20	1	20
		ТОП-1,5	3	1	3
		Трансформатор ТС-300			
		Кип'ятильник			
		Всього			341,5
1	Освітлення	Трансформатор ТСШ	4,5	2	9
		Всього по секції №2			630

Скреперні лебідки підготовчих робіт отримують живлення напругою 0,4 кВ від тієї ж мережі, що і лебідки видобувних робіт,

Завантаження ЗР, котра накопичується після скрепіювання на видобувних ділянках (блоках) у вагонетки, виконується за допомогою вібролюків з електричними двигунами потужністю 10-14 кВт. Незалежно від загальної кількості люків у орті-заїзді, одночасно включається, як правило,

тільки один. Термін разового функціонування вібролюків обмежується терміном загрузки вагонеток електровоза. Вентилятори місцевого провітрювання на видобувних ділянках використовуються не часто. Зазвичай провітрювання проводиться за рахунок загальношахтної депресії або пневматичними ежекторами.

ЕЕ споживається також освітленням, зварювальними трансформаторами, буровими верстатами, які не роблять істотного впливу на рівні максимальних навантажень.

Підводячи підсумки щодо електроприймачів, котрі отримують живлення напругою до 1000 В від трансформаторів ДПП (табл. 2.3, 2.4) логічним виглядає висновок, що режими роботи машин та механізмів, котрі аналізуються, повністю залежить від обсягів видобутку ЗР, обсягів ведення підготовчих (нарізних) робіт та носить безперервний в годинах доби характер в відповідних блоках підземних горизонтів залізрудних шахт.

В свою чергу, види та типи електрообладнання й електропостачання підземних гірничих робіт залізрудних шахт, їх надійність та ефективність, в значній мірі залежить від гірничотехнічних умов кожної окремо взятої шахти, що суттєво впливає на роботу технологічного обладнання взагалі і електрообладнання шахти окремо.

Цим фактом режими роботи приймачів ЕЕ ДПП відрізняється від стаціонарних установок – головних водовідливних комплексів та головних вентиляційних установок шахт, режими котрих не залежать від режиму роботи шахти та обсягів видобутку ЗР. Саме цей факт є системостворюючим в формуванні алгоритму управління режимами споживання ЕЕ споживачами до 1000 В ДПП.

Разом з тим, аналізуючи показники розподілу електроенергопотоків між споживачами залізрудних шахт, в реаліях процесу електропостачання даних видів підземних підприємств, зазначимо, як факт, зміну співвідношень в рівнях сегментів електроспоживання з роками.

Так, як доведено автором, опосереднений відсоток споживання ЕЕ енегоемними споживачами залізорудних шахт Криворізького залізорудного басейну в останні роки змінився наступним (табл. 2.5).

Як свідчать дані табл. 2.5 показники змінилися, але по пунктах 5 – 7 ці зміни незначні і наближені до рівня 20 %. Таке «наближення» не повинно минати проблему збільшення загальної енергоефективності даних видів підприємств, тим паче, що по даному показнику пункти 1 – 4 наближаються до рівня вичерпності свого потенціалу.

Таблиця 2.5 – Опосереднені показники споживання електроенергії залізорудними шахтами Криворізького залізорудного басейну

№ з/п	Вид споживача електричної енергії	% в загальному обсязі споживання ЕЕ залізорудною шахтою		Відхилення % (+/-)
		1990	2021	
1	Головний водовідлив	11,1	36,6	(+) 229,7
2	Скіповий підйом	34,8	23,5	(-)32,5
3	Вентилятори головного підприємства	15,6	23,1	(+)21,2
4	Центральні (районні) компресорні станції (ЦКС, РКС)	18,8	Виведено із обліку споживачів ЕЕ шахт	
5	Внутрішньошахтний транспорт – електровозна відкатка руди	6,5	3,8	(-)71
6	ДСФ	11,0	8,6	(-)2,4
7	Інші	2,2	4,4	(+)2,2

2.3 Засадничі імперативи моніторингу процесу: електропостачання – електроспоживання – обсяги видобутку залізної руди як системи

Комплекс джерел і засобів збору й обробки інформації є одним з важливих елементів системи управління електроенергетичною, як складовою загальної СК промисловим підприємством взагалі та шахт зокрема. З іншого боку, недоцільним та не необхідним є збирання інформації, котра не є корисною в процесі конкретики прийняття рішень, тому що це приводить до росту витрат на систему моніторингу й знижує ефективність аналітичної діяльності пошуку. А, оскільки, основою прийняття рішень є минулий, сучасний і майбутній економіко-технічний стан шахти, то основними складовими частинами системи моніторингу можуть бути саме показники його техніко-економічного стану загалом та електропостачання зокрема [157].

Існуючі системи моніторингу у своїй основі містять більшою мірою фінансові показники, що робить їх орієнтованими на ретроспективу й не дозволяє прогнозувати основні поточні параметри стану [158]. Така ситуація спричиняє необхідність використання більш комплексних систем спостереження, що дозволяють здійснювати всебічний аналіз даних і синтез управлінських дій.

Але, в даний час при всьому різноманітті і доступності збору інформації, існують проблеми, як об'єктивні так і суб'єктивні, з її збиранням, зберіганням, обробкою. Особливо це стосується сьогодення в умовах таких стратегічних об'єктів промисловості держави, як гірничо-видобувні. Неповнота інформації про показники системи електропостачання – електроспоживання – обсяги видобутку залізної руди, або, її надмірність, несвоєчасність надходження інформації, та інші негативні фактори ускладнюють комплексне оцінювання системи

На думку автора, моніторинг повинен розглядатися як одна з важливіших відносно самостійних ланок в управлінському циклі щодо реалізації вимог до енергоефективності. У рамках моніторингу проводиться виявлення і оцінювання дій щодо здійснення заходів по управлінню

електропостачанням. При цьому забезпечується зворотній зв'язок, який надає інформацію про відповідність фактичних результатів цілям забезпечення енергоефективності.

Завдання полягає саме в тому, щоб правильно оцінити міру, напрям і причини відхилення від поставлених цілей визначеної поточної ситуації і результатів. Ці відхилення визиваються впливом різних зовнішніх і внутрішніх чинників на підприємство.

Одночасно варто помітити, що форма і зміст вихідних результатів моніторингу електропостачання шахти, визначаються з урахуванням потреб в інформації його учасників, тобто фахівців, що беруть участь у моніторингу. На нашу думку, головне в моніторингу - не охопити якнайбільше напрямків, а чітко й вчасно фіксувати їхній стан по заздалегідь певній сукупності ознак.

Моніторинг як функція управління припускає збір інформації, її комплексну оцінку й прогноз по відповідній системі показників. Необхідність реалізації цієї вимоги диктується його орієнтованістю на аналіз, порівняння результатів управління. Стандартність інформаційного набору забезпечує також зручність його пошуку й фіксації й надає моніторингу властивості інформаційного процесу.

Охарактеризувати моніторинг можна також як оперативний збір даних про складні явища й процеси, що можуть бути описані досить невеликою кількістю ключових, особливо важливих показників з метою оперативної діагностики стану об'єкта дослідження в динаміці. Акцентуючи увагу на властивості щодо оперативності моніторингу, доцільно уточнити визначення моніторингу як націленому на оперативне відстеження й аналіз інформаційних рухів, що відбуваються в процесі електропостачання.

Динамічність об'єкта, можливість виникнення небезпеки в процесі його функціонування й розміри небезпеки визначають необхідність і доцільність використання моніторингу для дослідження, а також вибір тієї або іншої конкретної системи моніторингу. Крім цього необхідно відзначити й ще одну особливість - можливість побудови прогнозу розвитку тієї або іншої системи

в умовах відсутності флуктуаційних відхилень або форс-мажорних обставин, що надає моніторингу особливу цінність і значимість із погляду потенційного користувача.

Стосовно систем електропостачання саме для умов залізрудних шахт, з їх специфікою в технології видобутку ЗР і відповідного віддзеркалення в процесах споживання ЕЕ, пропонуємо виділити три види моніторингу залежно від його цілей.

Інформаційний – передбачає структурування, накопичення й розповсюдження інформації щодо електропостачання шахт. Передбачає застосування звітної інформації. Така інформація структурована, як за місцем, датою, часом. Накопичення й розповсюдження інформації здійснюється у звітах.

Базовий або фоновий – виявлення нових проблем і небезпек до того, як вони стануть усвідомлювані на рівні управління електропостачанням шахти. За об'єктом моніторингу організується досить постійне спостереження за допомогою періодичного виміру показників (індикаторів), які досить повно його визначають. Для реалізації цього виду моніторингу можуть бути використані будь-які із трьох можливих ознак порівняння. Вибір того або іншого варіанту буде визначатися цілями моніторингу.

Проблемний – з'ясування закономірностей, процесів, небезпек тих проблем, які відомі й актуальні з точки зору розбудови системи управління електропостачанням шахти.

З точки зору системності, моніторинг стану електропостачання шахти можна розглядати не лише як сукупність способів дослідження, але і як систему, яка містить певний набір елементів. Відповідно до запропонованих автором видів моніторингу для електропостачання шахт було проведено дослідження на діючих підземних підприємствах Кривбасу за наступними показниками: дата; час; електропостачання (активна енергія); постачання; виробництво (рис. 2.11 – 2.15).

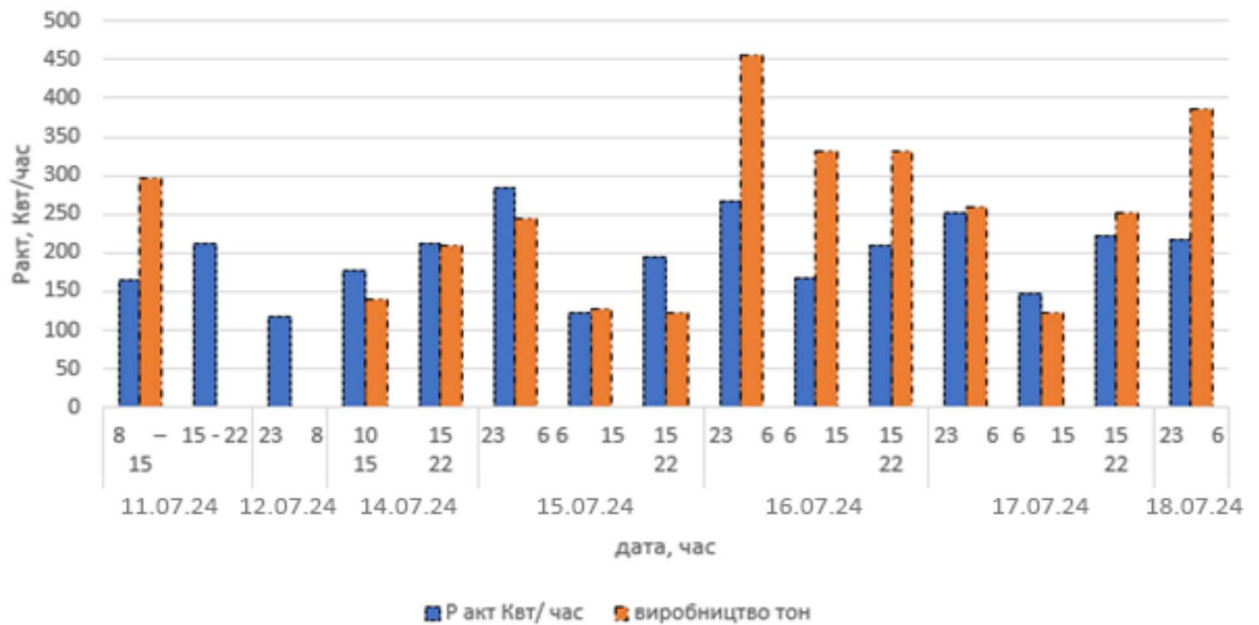


Рисунок 2.11 – Моніторинг системи постачання електричної енергії для приймачів з напругою живлення до 1000В ДПП – виробництво шахти №2 (м. Кривий Ріг) для трансформатора 1

Вибір показників обґрунтовувався існуючою звітністю шахт, яка складає основу моніторингової діяльності задля забезпечення ефективного управління процесом електропостачання підземного залізрудного підприємства.

Аналіз представлених графічних візуалізацій дозволяє в форматі конкретики дійти наступних висновків для трансформатора 1 (рис. 2.12).

На дату 11.07.2024 р., не зважаючи на наявність електропостачання, практично відсутнє виробництво. Представляє інтерес співвідношення електропостачання – виробництво відповідно дат з 15.07.2024 по 18.07.2024, де із зменшенням електропостачання зростає виробництво. Загалом електропостачання відмічається як хвилюподібний у часі процес. Найбільше значення відповідає часу доби з 23 по 6 годину.

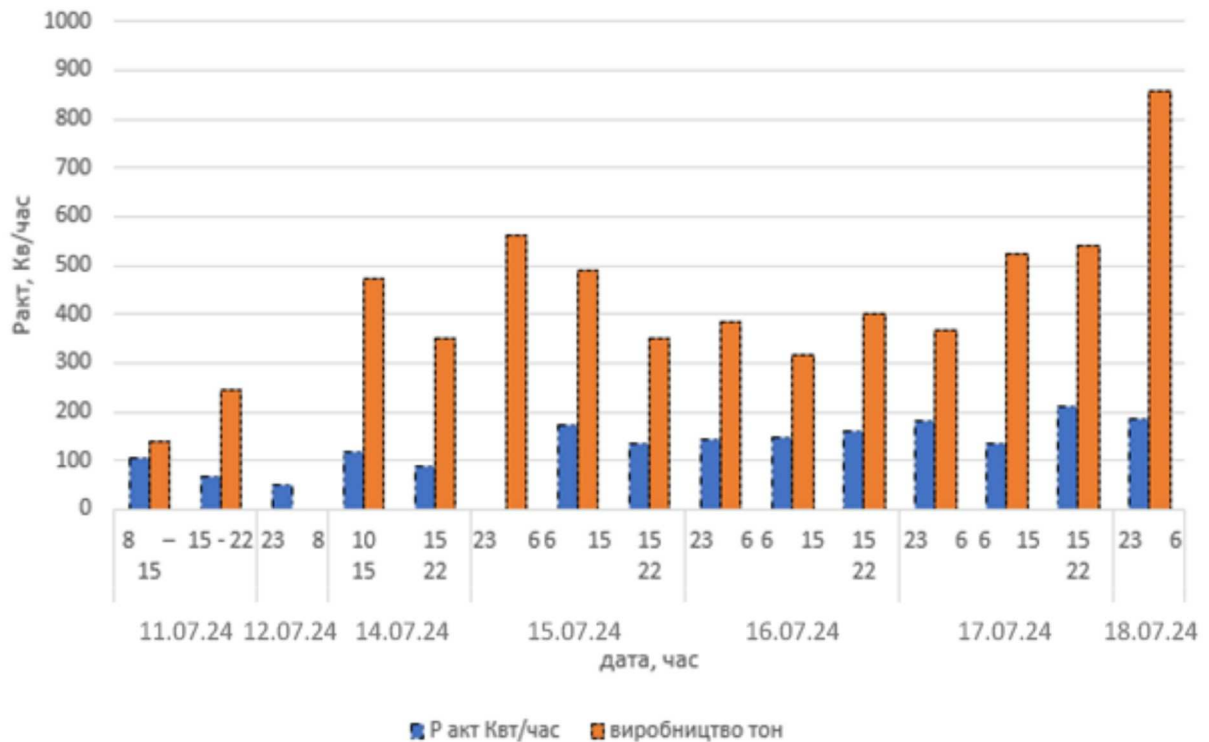


Рисунок 2.12 – Моніторинг процесу: електропостачання – виробництво для приймачів з напругою живлення до 1000В ДПП шахти №1 (м. Кривий Ріг) для трансформатора 2

Для трансформатора 2 (рис. 2.12). Електропостачання має на відміну від трансформатора 1, має практично рівномірний, стабільний стан за невеликими відмінностями в період з 11.07.2024 по 14.07.2024 рр. відмітити можна дату 15.07.2024 р., коли в час з 23.00 по 6.00 години знижується електропостачання, а виробництво зростає. Таким же співвідношенням характеризується й дата 18.07.2024 р.

Візуалізація даних рис. 2.13 дає підстави стверджувати, що для шахти №2 (трансформатор 1) характерним є практично рівномірне постачання електроенергії і незалежно від цього виробництво. Нарешті можна виділити ділянки 23.09.2024 р. час з 15.00 до 23.00 та 24.09.2024 р. час з 23.00 до 9.00. Аналогічними є часові проміжки для 25.09 та 26.09.

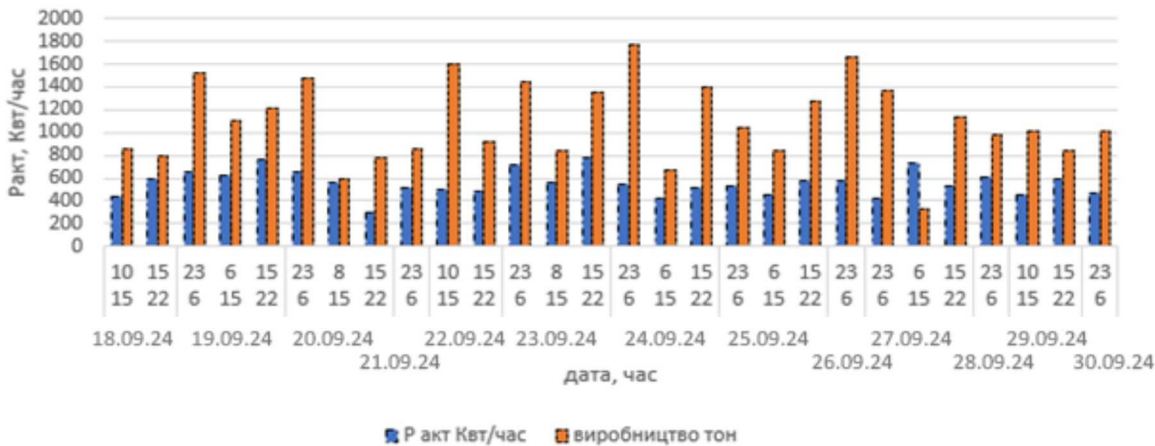


Рисунок 2.13 – Моніторинг системи електропостачання – виробництво для приймачів з напругою живлення до 1000В ДПП шахти №2 (м. Кривий Ріг) для трансформатора №1

Для шахти №2 (трансформато 2) слід відзначити рівномірне постачання електроенергії (рис. 2.14). Виробництво має стрибкоподібний характер. Зниження електропостачання і відповідно виробництва спостерігається 20.09.2024 з 15.00 по 22.00 та 21.09.2024 р. з 23.00 по 6.00 години. Надалі можна фіксувати візуальну відсутність корельованості електропостачання й виробництва.

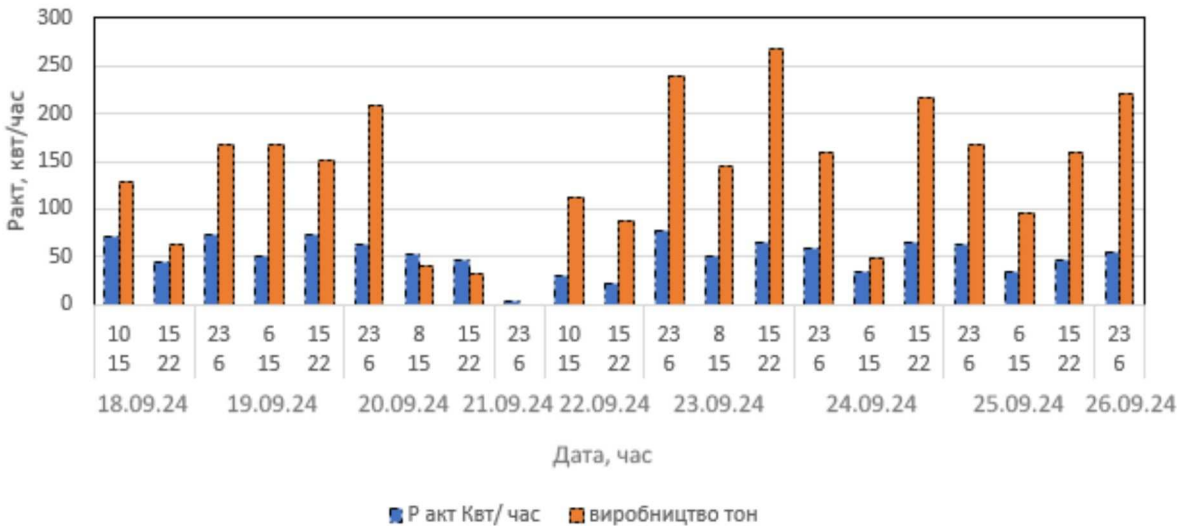


Рисунок 2.14 – Моніторинг системи електропостачання – виробництво для приймачів з напругою живлення до 1000В ДПП шахти №2 (м. Кривий Ріг) для трансформатора №2

Візуальний аналіз системи електропостачання-виробництво (рис. 2.15) надає наступну інформацію: 29.10.2024 р. з 15.00 по 22.00 відбувається сплеск електропостачання, але виробництво знизилось. 30.10.2024 р.в період з 15.00 по 22.00 різко було знижено виробництво при рівномірному електропостачанні.

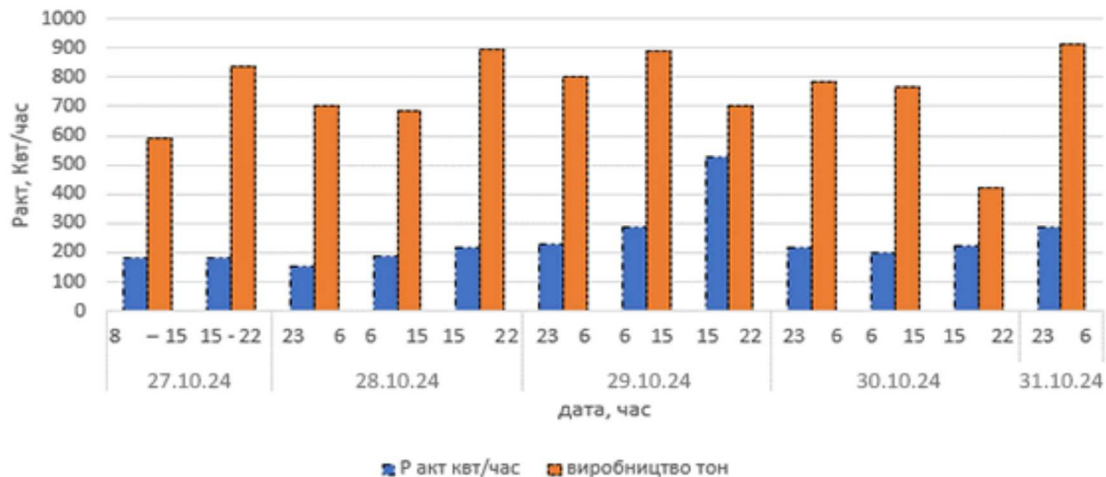


Рисунок 2.15 – Моніторинг системи електропостачання – виробництво для приймачів з напругою живлення до 1000В ДПП шахти №5 (м. Кривий Ріг)

Проведені автором дослідження дають підстави стверджувати про відсутність певних закономірностей в комплексі енергопостачання – виробництво. Для кожного окремого підприємства, а саме конкретної шахти в наявності стохастичність кожної складової системи. Тобто рівномірність електропостачання не відповідає рівномірності виробництва. Відсутня наочна залежність погодинного постачання електроенергії. Це свідчить про відсутність щодо ефективного управління комплексом електропостачання – виробництво і потребує наразі її удосконалення.

Таким чином, можемо стверджувати, що проведений моніторинг аналіз системи електропостачання – виробництво є підґрунтям для подальших досліджень. Отриману інформаційну складову доцільно використати при кількісному аналітичному моделюванні задля отримання відповідних

рекомендацій по ефективному управлінню комплексом електропостачання – виробництво.

Сьогодні обмежуватися лише контролем за рівнем споживання електроенергії недостатньо – необхідно керувати цим процесом. При цьому треба враховувати, що система управління повинна певною мірою реагувати адаптивно-превентивно на виникнення відповідних факторів, що збурюють, у технологію змін режимів функціонування електроприймачів, якими для умов залізорудних підприємств є стаціонарні установки.

Як зазначалось у Розділі 1 даного дослідження, як факт, є наявність багатьох альтернатив щодо підходів до підвищення електроенергоефективності гірничих підприємств. Але у більшості, якщо не у всіх цих дослідженнях, як показали дослідження, підхід, в значний мірі, обмежувався тільки рівнем вибору параметрів СЕП та інших локальних складових процесу електропостачання – електроспоживання підземних гірничих підприємств. У той же час, конкретних рішень у цих дослідженнях бракувало. Проблема щодо необхідності підвищення енергоефективності видобутку ЗР ґрунтується на відповідних природних процесах, а саме – погіршення технологічних умов. З часом збільшуються глибини видобутку ЗР і це, в свою чергу, ставить на новий щабель якісні ступені пошуку. Проведені дослідження дають підстави стверджувати – значна кількість науково-практичних досліджень присвячена аналізу умов видобутку ЗР на глибинах до 1000 м. Таким чином, існує доцільність й необхідність у сучасних умовах дослідити оцінювання ефективності електроспоживання залізорудних підприємств із підземним способом видобутку ЗР.

У практичному плані це дозволить забезпечити енергоефективність, а значить і вплив цього показника на загальну економіку, залізорудних підприємств із підземним способом видобутку ЗР.

Основний зміст методики аналізу щодо ефективності електроспоживання підприємств із підземним способом видобутку ЗР складається із побудови стохастичних моделей для часових рядів з напруги у

розподільних шахтних мережах у часовій області та застосування опрацьованих моделей. Логічно, в разі дискретного часового ряду, час змінюється дискретно. Спостереження дискретного часового ряду з напруги у розподільних шахтних мережах, зроблені у моменти часу $t_1, t_2, \dots, t_i, \dots, t_N$, можуть бути позначені $u(t_1), u(t_2), \dots, u(t_i), \dots, u(t_N)$. Якщо спостереження робляться через фіксований інтервал часу Δt і є N послідовних значень спостережень ряду, можна записати $u_1, u_2, \dots, u_i, \dots, u_N$, позначаючи спостереження, зроблені в рівновіддалені моменти часу $t_0 + \Delta t, t_0 + 2\Delta t, \dots, t_0 + i \cdot \Delta t, \dots, t_0 + N\Delta t$. Надалі, значення t_0 і Δt не важливі, але якщо необхідно точно визначити спостереження, то необхідно вказати їх значення. Якщо прийняти t_0 за начало відліку часу, тобто $t_0 = 0$, а Δt за одиницю часу, тобто $\Delta t = 1$, то u_i можна розглядати як спостереження напруги в i -ий момент часу. Для опису поведінки фізичних об'єктів зазвичай застосовуються їх математичні моделі. Якщо вдається отримати модель, засновану на фізичних законах, така модель була б детермінованою. Разом з цим, практично навіть така модель не є повністю детермінованою, оскільки у ній можуть брати участь ряд неврахованих чинників. Для таких об'єктів не можна запропонувати детерміновану модель, яка допускає точне обчислення майбутньої поведінки об'єкта. Тим не менш, можна запропонувати модель, що дозволяє обчислити ймовірність того, що деяке майбутнє значення буде лежати в певному інтервалі. Така модель називається стохастичною. Стохастичність притаманна моделям часових рядів з напруги у розподільних шахтних мережах у часовій області. Важливий клас стохастичних моделей для опису часових рядів є стаціонарні моделі. Вони ґрунтуються на припущенні, що процес залишається в рівновазі щодо постійного середнього рівня, що підтверджується вивченням часових рядів у розподільних шахтних мережах у часовій області.

Наріжним прикладним завданням – прогнозування значень часового ряду на основі його поточних й минулих значень. На практиці завжди існує необхідність у прогнозі вперед на інтервал, що називається часом попередження. Загально відомим є необхідність припущення про

стаціонарність при формуванні моделей стохастичних часових рядів. Рекомендується, стаціонарний стохастичний часовий ряд описувати відповідними середнім значенням, дисперсією та автокореляційною функцією. Оцінювання середнього значення дискретного стохастичного процесу доцільно розраховувати, як середнє вибіркове

$$\bar{u} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u_i, \quad (2.1)$$

де $u_1, u_2, \dots, u_N$ - значення часового ряду.

Відповідно дисперсія дискретного стохастичного процесу оцінюється на основі вибіркової дисперсії

$$\sigma_u^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (u_i - \bar{u})^2. \quad (2.2)$$

Оцінювання щодо зв'язку між значеннями часового ряду визначається як автокореляція із затримкою k , яка дорівнює

$$\rho_k = \frac{1}{(N-1) \cdot \sigma_u^2} \sum_{i=1}^{N-k} (u_i - \bar{u})(u_{i+k} - \bar{u}), \quad (2.3)$$

$$k = 0, 1, 2, \dots, K.$$

При дослідженні дискретних стохастичних процесів, якими є часові ряди з напруги у розподільних шахтних мережах у часовій області, виникає задача про викиди [156]. Під завданням про викиди для згаданого часового ряду розуміється визначення виходу ординати випадкового часового ряду за заданий рівень та знаходження ймовірнісних характеристик часу перебування ординат випадкового часового ряду вище за заданий рівень. Зрозуміло, що викиди негативно впливають на ефективність електроспоживання підприємств із підземним способом видобутку ЗР. Зокрема, розглянемо визначення ймовірності викиду для даного значення аргументу випадкового часового ряду та визначення середньої кількості викидів, що припадає на заданий інтервал часу, а також середню тривалість викиду.

Нехай задано деяке число α , яке визначає рівень напруги, викиди за який пов'язані з якістю електроспоживання. Позначимо значення елемента

випадкового часового ряду у довільний момент часу i через u_i . Тоді шукана ймовірність викиду $p_i(\alpha)$ в момент часу i визначиться рівністю

$$p_i(\alpha) = P\{u_i \leq \alpha; \alpha < u_{i+1}\} . \quad (2.4)$$

Для визначення ймовірності (2.4) введемо на розгляд двовимірну щільність розподілу

$$f(u_i, u_{i+1}) \quad (2.5)$$

ординат випадкового часового ряду. Тоді ймовірність (2.4) можна представити у вигляді інтеграла

$$p_i(\alpha) = \int_{-\infty}^{\alpha} \int_{\alpha}^{+\infty} f(u_i, u_{i+1}) du_{i+1} du_i . \quad (2.6)$$

Аналогічно може бути підрахована можливість викиду за рівень α зверху
вниз

$$\tilde{p}_i(\alpha) = P\{u_i \geq \alpha; \alpha > u_{i+1}\} . \quad (2.7)$$

Тоді формула (2.7) з урахуванням (2.5) приймає вигляд

$$\tilde{p}_i(\alpha) = \int_{\alpha}^{+\infty} \int_{-\infty}^{\alpha} f(u_i, u_{i+1}) du_{i+1} du_i . \quad (2.8)$$

У разі стаціонарного стохастичного часового ряду двовимірна щільність розподілу (2.5) не залежить від індексу i , отже, ймовірності (2.6) та (2.8) матимуть незмінні значення для будь-якої величини часу i .

В цьому випадку формули (2.6) і (2.8) приймуть відповідно вигляд

$$p(\alpha) = \int_{-\infty}^{\alpha} \int_{\alpha}^{+\infty} f(u_i, u_{i+1}) du_{i+1} du_i , \quad (2.9)$$

$$\tilde{p}(\alpha) = \int_{\alpha}^{+\infty} \int_{-\infty}^{\alpha} f(u_i, u_{i+1}) du_{i+1} du_i . \quad (2.10)$$

На практиці досить часто є сенс розглядати стохастичний стаціонарний нормальний часовий ряд з незалежними елементами. Тоді для двовимірної щільності розподілу (2.5) будемо мати:

$$f(u_i, u_{i+1}) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{(u_i - \bar{u})^2 + (u_{i+1} - \bar{u})^2}{2\sigma^2}} , \quad (2.11)$$

де $\bar{u}$ – середня величина напруги, σ – середньоквадратичне відхилення напруги, V .

Підставляючи (2.11) в (2.9), знаходимо величину ймовірності

$$p(\alpha) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \int_{-\infty}^{\alpha} \int_{\alpha}^{+\infty} e^{-\frac{(u_i - \bar{u})^2 + (u_{i+1} - \bar{u})^2}{2\sigma^2}} du_i du_{i+1}, \quad (2.12)$$

Перетворюємо інтеграл (12), зводячи його до добутку двох інтегралів

$$p(\alpha) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \int_{-\infty}^{\alpha} e^{-\frac{(u_i - \bar{u})^2}{2\sigma^2}} du_i \int_{\alpha}^{+\infty} e^{-\frac{(u_{i+1} - \bar{u})^2}{2\sigma^2}} du_{i+1}. \quad (2.13)$$

Для обчислення інтегралів зручно представити формулу (2.13) у вигляді

$$p(\alpha) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{-\infty}^{\alpha} e^{-\frac{(u_i - \bar{u})^2}{2\sigma^2}} du_i \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{\alpha}^{+\infty} e^{-\frac{(u_{i+1} - \bar{u})^2}{2\sigma^2}} du_{i+1}. \quad (2.14)$$

Обчислюємо перший із інтегралів в формулі (2.14)

$$\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{-\infty}^{\alpha} e^{-\frac{(u_i - \bar{u})^2}{2\sigma^2}} du_i = \left| \begin{array}{l} t = \frac{u_i - \bar{u}}{\sigma} \quad u_i = t \cdot \sigma + \bar{u} \\ \& u_i = -\infty \rightarrow t = -\infty \\ \& u_i = \alpha \rightarrow t = \frac{\alpha - \bar{u}}{\sigma} \end{array} \right. du_i = \sigma \cdot dt \Bigg| = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\frac{\alpha - \bar{u}}{\sigma}} e^{-\frac{t^2}{2}} dt, \quad (2.15)$$

$$\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\frac{\alpha - \bar{u}}{\sigma}} e^{-\frac{t^2}{2}} dt = \frac{1}{2} \Phi(t) \Big|_{-\infty}^{\frac{\alpha - \bar{u}}{\sigma}} = \frac{1}{2} \left[1 + \Phi\left(\frac{\alpha - \bar{u}}{\sigma}\right) \right]$$

де $\Phi(x) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-\frac{t^2}{2}} dt$ – інтегральна функція Лапласа.

Аналогічно обчислюється другий інтеграл в формулі (2.14)

$$\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{\alpha}^{+\infty} e^{-\frac{(u_{i+1} - \bar{u})^2}{2\sigma^2}} du_{i+1} = \frac{1}{2} \Phi(t) \Big|_{\frac{\alpha - \bar{u}}{\sigma}}^{+\infty} = \frac{1}{2} \left[\Phi(+\infty) - \Phi\left(\frac{\alpha - \bar{u}}{\sigma}\right) \right] = \frac{1}{2} \left[1 - \Phi\left(\frac{\alpha - \bar{u}}{\sigma}\right) \right]. \quad (2.16)$$

Враховуючи (15) і (16) формула (2.14) приймає вигляд

$$p(\alpha) = \frac{1}{2} \left[1 + \Phi\left(\frac{\alpha - \bar{u}}{\sigma}\right) \right] \cdot \frac{1}{2} \left[1 - \Phi\left(\frac{\alpha - \bar{u}}{\sigma}\right) \right],$$

або, згідно з формулою різниці квадратів,

$$p(\alpha) = \frac{1}{4} \left[1 - \Phi^2\left(\frac{\alpha - \bar{u}}{\sigma}\right) \right]. \quad (2.17)$$

Дослідимо функцію (2.17) на екстремум, скориставшись тим, що похідна в точці екстремуму дорівнює нулю:

$$p'(\alpha) = \left[\frac{1}{4} \left[1 - \Phi^2 \left(\frac{\alpha - \bar{u}}{\sigma} \right) \right] \right]' = -\frac{1}{2\sigma} \Phi \left(\frac{\alpha - \bar{u}}{\sigma} \right) \Phi' \left(\frac{\alpha - \bar{u}}{\sigma} \right) = 0,$$

$$p'(\alpha)|_{\alpha=\bar{u}} = -\frac{1}{2\sigma} \Phi \left(\frac{\bar{u} - \bar{u}}{\sigma} \right) \Phi' \left(\frac{\bar{u} - \bar{u}}{\sigma} \right) = -\frac{1}{2\sigma} \Phi(0) \Phi'(0) = 0.$$

оскільки $\Phi(0)=0$.

Таким чином, коли $\alpha=\bar{u}$ функція (2.17) досягає екстремуму. Для визначення характеру екстремуму скористаємось знаком похідної другого порядку функції (2.17) в точці екстремуму. Обчислюємо похідну другого порядку функції (2.17) як похідну від похідної першого порядку цієї функції

$$p'' \left[-\frac{1}{2\sigma} \Phi \left(\frac{\alpha - \bar{u}}{\sigma} \right) \Phi' \left(\frac{\alpha - \bar{u}}{\sigma} \right) \right] \frac{1}{2\sigma^2} \left[\left(\Phi' \left(\frac{\alpha - \bar{u}}{\sigma} \right) \right)^2 + \Phi \left(\frac{\alpha - \bar{u}}{\sigma} \right) \Phi'' \left(\frac{\alpha - \bar{u}}{\sigma} \right) \right] \Big|_{\alpha=\bar{u}}, \quad (2.18)$$

$$p'' \frac{1}{2\sigma^2} \left[\left(\Phi'(0)^2 + \Phi(0) \Phi''(0) \right) \right] \frac{1}{2\sigma^2} (0)^2.$$

Оскільки

$$\Phi'(x) = \left[\frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-\frac{t^2}{2}} dt \right]' = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}},$$

$$\Phi'(0) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}},$$

то, згідно (2.18), маємо

$$p'' \frac{1}{2\sigma^2} \frac{4}{2\pi} \frac{1}{\pi\sigma^2} \quad (2.19)$$

Згідно умові (2.19) функція (2.17) при $\alpha=\bar{u}$ досягає максимуму.

Знайдемо величину цього максимуму, підставляючи $\alpha=\bar{u}$ в формулу (2.17),

$$p(\bar{u}) = \frac{1}{4} \left[1 - \Phi^2 \left(\frac{\bar{u} - \bar{u}}{\sigma} \right) \right] = \frac{1}{4} (1 - \Phi^2(0)) = 0.25. \quad (2.20)$$

Формула (2.20) вказує на те, що найбільша ймовірність викиду досягається, коли лінія рівня викиду дорівнює вибірковому середньому.

Аналогічно знаходиться формула для ймовірності перетину рівня α зверху вниз, яка має вигляд

$$\tilde{p}(\alpha) = \frac{1}{2} \left[1 - \Phi \left(\frac{\alpha - \bar{u}}{\sigma} \right) \right] \cdot \frac{1}{2} \left[1 + \Phi \left(\frac{\alpha - \bar{u}}{\sigma} \right) \right],$$

або

$$\tilde{p}(\alpha) = \frac{1}{4} \left[1 - \Phi^2 \left(\frac{\alpha - \bar{u}}{\sigma} \right) \right] \quad (2.21)$$

Таким чином, порівнюючи формули (2.17) і (2.21), можна зробити висновок, що ймовірності перетину рівня α співпадають. Зрозуміло, якщо розглядаються викиди в обидві сторони від лінії рівня α , то потрібно ймовірності (2.17) і (2.21) скласти, тобто подвоїти

$$\hat{p}(\alpha) = p(\alpha) + \tilde{p}(\alpha), \quad \hat{p}(\alpha) = \frac{1}{2} \left[1 - \Phi^2 \left(\frac{\alpha - \bar{u}}{\sigma} \right) \right]. \quad (2.22)$$

Для знаходження середнього часу перебування стохастичного часового ряду вище за рівень α , розрахований для проміжку часу T , матимемо

$$\bar{t}_\alpha = T \cdot \int_{\alpha}^{+\infty} f(u_i) du_i, \quad (2.23)$$

або, з урахуванням того, що

$$f(u_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(u_i - \bar{u})^2}{2\sigma^2}}, \quad (2.24)$$

формула (2.18) приймає вигляд

$$\bar{t}_\alpha = T \cdot \int_{\alpha}^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(u_i - \bar{u})^2}{2\sigma^2}} du_i = \frac{T}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{\alpha}^{+\infty} e^{-\frac{(u_i - \bar{u})^2}{2\sigma^2}} du_i = \frac{T}{2} \left(1 - \Phi \left(\frac{\alpha - \bar{u}}{\sigma} \right) \right), \quad \bar{t}_\alpha = \frac{T}{2} \left(1 - \Phi \left(\frac{\alpha - \bar{u}}{\sigma} \right) \right) \quad (2.25)$$

Зазвичай представляє інтерес середній час перебування стохастичного часового ряду вище заданого рівня α протягом одного викиду. Для визначення цього середнього часу $\bar{t}$ необхідно час $\bar{t}_\alpha$ поділити на середню кількість викидів $\bar{n}_\alpha$, що мали місце протягом часу T . Для визначення $\bar{n}_\alpha$ розіб'ємо проміжок T на m рівних інтервалів Δt_j і введемо допоміжні випадкові величини N_j , кожна з яких дорівнює одиниці, якщо всередині інтервалу є викид і нуль - у протилежному випадку. Тоді повна кількість викидів N_α за проміжок T дорівнюватиме сумі величин N_j

$$N_\alpha = \sum_{j=1}^m N_j. \quad (2.26)$$

Знаходимо математичне сподівання від обох частин рівності (2.26)

$$M[N_\alpha] = \sum_{j=1}^m M[N_j]. \quad (2.27)$$

Враховуючи, що

$$M[N_\alpha] = \bar{n}_\alpha \quad ; \quad M[N_j] = p(\alpha) \cdot \Delta t_j,$$

маємо, згідно (2.27),

$$\begin{aligned} \bar{n}_\alpha &= \sum_{j=1}^m p(\alpha) \cdot \Delta t_j = p(\alpha) \sum_{j=1}^m \Delta t_j = p(\alpha) \cdot T \\ \bar{n}_\alpha &= p(\alpha) \cdot T. \end{aligned} \quad (2.28)$$

Враховуючи (2.17), формула (2.23) приймає вигляд

$$\bar{n}_\alpha = \frac{T}{4} \left[1 - \Phi^2 \left(\frac{\alpha - \bar{u}}{\sigma} \right) \right] \quad (2.29)$$

Тоді середня тривалість перебування стохастичного часового ряду вище за заданого рівня α знаходиться за формулою

$$\bar{\tau} = \frac{\bar{t}_\alpha}{\bar{n}_\alpha}. \quad (2.30)$$

Згідно (2.20) та (2.24), формула (30) приймає вигляд

$$\bar{\tau} = \frac{\frac{T}{2} \left(1 - \Phi \left(\frac{\alpha - \bar{u}}{\sigma} \right) \right)}{\frac{T}{4} \cdot \left[1 - \Phi^2 \left(\frac{\alpha - \bar{u}}{\sigma} \right) \right]} = \frac{2}{\left[1 + \Phi \left(\frac{\alpha - \bar{u}}{\sigma} \right) \right]}. \quad (2.31)$$

На основі теоретичного опрацювання, автором проведені розрахункові дослідження споживання ЕЕ на основі експериментальних даних шахти №7, гор. 1300.

В табл. 2.5 приведені статистичні дані по напрузі за період з 30.06.2021 по 6.07.2021 рр.

Таблиця 2.5 – Статистичні дані щодо напруги живлення споживачів електроенергії шахти №7, гор. 1300

№	Напруга, u_k	№	Напруга, u_k
1	6742	21	1051
2	2197	22	1478

3	1331	23	3033
4	1006	24	9080
5	7133	25	6743
6	9284	26	2585
7	2837	27	1331
8	9080	28	1024
9	6742	29	7219
10	2483	30	3811
11	1331	31	3033
12	1022	32	9080
13	3415	33	6744
14	1685	34	2590
15	2837	35	1331
16	9080	36	1024
17	6742	37	2563
18	2488	38	7714
19	1331	39	3040
20	1022	40	9080

Аналіз часового ряду дозволяє зробити висновок про дискретність стохастичного ряду. Знайдемо числові характеристики цього ряду. Знаходимо вибіркове середнє згідно формули (2.1)

$$\bar{u} = \frac{1}{40} \sum_{k=1}^{40} u_k = 4084 \quad (2.32)$$

Вибіркова дисперсія знаходиться по формулі (2.2)

$$\sigma_u^2 = \frac{1}{39} \sum_{k=1}^{40} (u_k - \bar{u})^2 = 8935149 \quad (2.33)$$

В свою чергу, стандартне відхилення дорівнює

$$\sigma_u = 2989 \quad (2.34)$$

Для оцінки зв'язку між членами ряду із табл.2.4 скористаємось автокореляцією із затримкою k згідно формулі (2.3)

$$\rho_k = 2.87 \cdot 10^{-9} \sum_{i=1}^{40-k} (u_i - 4084)(u_{i+k} - 4084) \dots, \quad (k = 0, 1, 2, 3, 4). \quad (2.35)$$

Наступне питання полягає в аналізі відхилень напруги, які можна трактувати як викиди. Враховуючи, що між членами дискретного стохастичного ряду відсутній зв'язок і припускаючи, що стохастичний ряд є нормальним, обчислимо ймовірність того, що викид напруги перевищить заданий рівень.

Обчислення проводилось згідно формули (2.17)

$$p(\alpha) = \frac{1}{4} \left[1 - \Phi^2 \left(\frac{\alpha - 4084}{2989} \right) \right] . \quad (2.36)$$

Результати обчислень по формулі (2.36) представлені в табл. 2.6.

Таблиця 2.6 – Розрахунки ймовірності перевищення напруги заданого рівня

в	α ,	0	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000	9000	10000
	p	0.079	0.128	0.184	0.23	0.25	0.236	0.193	0.138	0.086	0.048	0.023

Згідно обчислень ймовірність викиду спочатку зростає, досягаючи найбільшого значення, коли рівень викиду дорівнює вибірковій середній, тобто

$$\alpha = \bar{u}. \quad (2.37)$$

Для знаходження середнього часу перебування стохастичного часового ряду вище за рівень α , розрахований для проміжку часу T , скористаємось формулою (2.25)

$$\bar{t}_\alpha = \frac{T}{2} \left(1 - \Phi \left(\frac{\alpha - 4084}{2989} \right) \right). \quad (2.38)$$

Для зручності подальших розрахунків представимо формулу (2.38) у вигляді

$$\tilde{t}_\alpha = \frac{\bar{t}_\alpha}{T} = \frac{1}{2} \left[1 - \Phi \left(\frac{\alpha - 4084}{2989} \right) \right]. \quad (2.39)$$

Результати обчислень по формулі (2.39) представлені в табл. 2.7

Таблиця 2.7 – Результати розрахунку середнього часу перебування стохастичного часового ряду вище за рівень α

α , в	0	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000	9000	10000
$\tilde{t}_\alpha$	0.914	0.849	0.757	0.642	0.511	0.38	0.261	0.165	0.095	0.05	0.024

Аналіз приведених результатів показує, що із зростанням рівня викиду α зменшується середній час перебування стохастичного часового ряду вище за рівень α , віднесеного на одиницю проміжку часу T .

Аналіз приведених результатів показує, що із зростанням рівня викиду α зменшується середня тривалість перебування стохастичного часового ряду вище заданого рівня α .

Таким чином, проведені дослідження дозволили дійти наступних висновків, а саме: встановлено, що в сьогочасних умовах, що характеризують технологію видобутку ЗР підземним способом та пов'язані з подальшим поглибленням шахт, існує доцільність й необхідність поглибленого аналізу електроспоживання різними пристроями, зокрема, аналіз викидів напруги за номінальний режим.

Виходячи з реальних умов функціонування залізорудних підприємств, побудовано математичну модель, яка дозволяє досліджувати якість електроспоживання. Особливістю запропонованої математичної моделі є те, що вона дозволяє провести аналіз впливу викидів напруги за заданий номінальний рівень. Дослідження викидів стохастичних часових рядів напруги в шахтній мережі дає можливість забезпечити вимоги щодо енергоефективності при підземних розробках.

2.4 Висновки до розділу 2

1. Отримані результати досліджень процесів в електромеханічних комплексах електропостачання -електроспоживання залізорудних шахт, дали можливість визначити напрями подальшого пошуку в цьому спрямуванні. Визначений та оцінений ряд технологічних параметрів в роботі гірничорудних підприємств, що впливають на рівень електроспоживання, ідентифікувати вхідні для розбудови математичної моделі з проведення відповідних досліджень в аналізуємому спрямуванні.

2. Сформована структурно-логічна схема дослідження процесів в комплексі електропостачання-електропостачання гірничорудних підприємств несе в собі відмінність щодо відомих, котра полягає у врахуванні: режимів електричних навантажень, електроенергетичних характеристик машин і механізмів, електробалансу підприємства та режимів споживання електроенергії.

3. Встановлено, що в сучасних умовах видобутку ЗР підземним способом, пов'язаним з подальшим поглибленням шахт, необхідний більш ретельніший аналіз електроспоживання різними технологічними механізмами і комплексами, зокрема, аналіз рівнів викидів напруги за номінальні і нормовані показники. Розроблена для такого формату досліджень математична модель дозволяє вести аналіз впливу викидів напруги за заданий номінальний рівень часу при реальних стохастичних часових рядах напруги в

шахтній мережі, що дає можливість враховувати ці фактори при подальшій розбудові відповідного алгоритму керування.

4. Застосування системного підходу в дослідженнях дозволило сформулювати загально індиферентні складові агрегативного технічного комплексу: електропостачання-електроспоживання, що дозволило визначити узагальнену структуру системи оцінювання процесу споживання електричної енергії, враховуючи споживачів з напругою живлення 0,4 кВ загальної електроенергетичної системи підземного залізорудного підприємства.

5.

РОЗДІЛ 3

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ФУНКЦІОНУВАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНОГО КОМПЛЕКСУ В УМОВАХ ТЕХНОЛОГІЇ РОБОТИ ПІДЗЕМНИХ ЗАЛІЗОРУДНИХ ПІДПРИЄМСТВ

3.1 Дослідження електроспоживання, як формату стохастичного процесу в умовах залізорудних шахт

Реальними спрямуваннями для досягнення мети – підвищення енергоефективності процесу видобутку ЗР, може бути розробка теоретичного обґрунтування шляхів досягнення аналізованої мети з залученням до цього цифрових методів супроводу процесу функціонування електроенергетичного комплексу електропостачання-електроспоживання на базі застосування сучасних ІТ-технологій. Проте, в логіку функціонування цих видів технологій в практику створення і роботи АСК, продекларованим попереду, електроенергетичним комплексом, необхідно закласти базу – специфіку впливу на параметри споживання ЕЕ системоутворюючих факторів цих видів підприємств. Особливо це спостерігається при такому виді процесу електроспоживання приймачами до 1000В, що має місце в умовах залізорудних шахт і, про, що доведено в попередньому розділі даного дослідження. Зрозуміло, що оцінювання особливостей процесу електроспоживання даними видами споживачів, згідно та у відповідності до канонічних існуючих методик, котрі базуються на врахуванні в якості цільових функцій середніх показників, не відповідає сучасним вимогам щодо якості обчислень і потребує нових підходів для якісного кінцевого рішення в досягненні мети пошуку.

Як один із можливих підходів, пропонуємих автором, є математичне моделювання процесу споживання ЕЕ приймачами до 1000В як процесу, з врахуванням особливостей (Додаток Г). В ході цього комплексу дослідження є підтвердження факту стохастичності процесу електроспоживання для

споживачів ЕЕ з напругою живлення до 1000В з оцінюванням його параметрів в умовах роботи СЕП залізорудних шахт.

В реальних умовах рівні споживання ЕЕ гірничорудних підприємств визначаються неоднозначною функцією, оскільки в кожний момент часу змінюють свій характер під впливом різних наперед невідомих причин [146, 148, 149, 157]. Далі, будемо вважати, що електроспоживання $W(t)$ є стаціонарним випадковим процесом в широкому сенсі цього визначення, тобто математичне очікування в такому форматі є постійне, а кореляційна функція залежить тільки від різниці аргументів:

$$M[W(t)] = m_w = \text{const}, K_w(t_1, t_2) = K_w(\tau), \quad (3.1)$$

де $\tau = t_2 - t_1$.

Формули (3.1) дозволяють врахувати стохастичний характер зміни споживання ЕЕ. Таким чином, для характеристики електроспоживання як стохастичного процесу в рамках кореляційної теорії необхідно знати не тільки її середню величину, але й кореляційну функцію і дисперсію.

На практиці виникають питання, пов'язані з необхідністю обчислення обсягу споживання за заданий проміжок часу, тобто обчислення інтеграла від рівнів споживання ЕЕ споживачами до 1000В як стохастичної функції:

$$Q(T) = \int_0^T W(t) dt, \quad (3.2)$$

де $[0; T]$ -заданий проміжок часу споживання ЕЕ, год.

Математичне очікування функції (2) знаходиться за формулою:

$$M[Q(T)] = M\left[\int_0^T W(t) dt\right] = \int_0^T M[W(t)] dt = \int_0^T m_w dt = m_w \cdot T, \quad ,$$

тобто

$$m_q(T) = m_w \cdot T \quad (3.3)$$

Враховуючи, що функція під знаком інтеграла (2.2) стаціонарна, кореляційна функція інтеграла (3.2) запишеться у вигляді подвійного інтеграла

$$K_q(t_1, t_2) = \int_0^{t_1} \int_0^{t_2} K_w(t'' - t') dt' dt'' \quad (3.4)$$

Оскільки вираз, який стоїть справа в формулі (3.4), залежить окремо від аргументів, а не від їхньої різниці, то інтеграл від стаціонарного процесу не має властивості стаціонарності. Проте внаслідок стаціонарності $W(t)$ формулу (3.4) можна представити у вигляді лінійної комбінації визначених інтегралів

$$K_q(t_1, t_2) = \int_0^{t_2} (t_2 - \tau) K_w(\tau) d\tau + \int_0^{t_1} (t_1 - \tau) K_w(-\tau) d\tau - \int_0^{t_2 - t_1} (t_2 - t_1 - \tau) K_w(\tau) d\tau \quad (3.5)$$

Якщо в формулі (3.5) вважати, що $t_2 = t_1 = T$, то для дисперсії інтеграла (3.2) отримаємо вираз, який залежить від параметра T , що показує не стаціонарність інтеграла від стаціонарної функції [157]:

$$D[Q(T)] = 2 \int_0^T (T - \tau) \cdot K_w(\tau) d\tau, \quad (3.6)$$

а середньоквадратичне відхилення з урахуванням (3.6) визначиться формулою

$$\sigma[Q(T)] = \sqrt{2} \cdot \sqrt{\int_0^T (T - \tau) K_w(\tau) d\tau}, \quad (3.7)$$

Дослідження споживання ЕЕ як стохастичного процесу дозволяє розв'язати «завдання про викиди» – ще один важливий супроводжуючий даний процес параметр, тобто про перетин випадковою функцією заданого рівня. Це, зокрема, дозволяє визначити середній час, протягом якого рівень споживання ЕЕ буде перевищувати заданий рівень внаслідок випадкових коливань цього процесу. Зрозуміло, що таке перевищення рівнів електроспоживання негативно віддзеркалиться на економічних показниках роботи підприємства в цілому.

При цьому розуміється, що в випадку, коли розглядається стаціонарний стохастичний процес, то середня тривалість «викиду» має наочне значення. Для стаціонарних процесів щільність розподілу значень рівнів споживання ЕЕ та щільність його розподілу та швидкість, не залежать від часу, тому формули

для середнього часу перебування стаціонарної випадкової функції вище заданого рівня $w=w_0$ протягом часу T , середньої кількості викидів за цей проміжок часу та середньої тривалості викиду набудуть вигляду [158]:

$$\bar{t}_{w_0} = T \int_{w_0}^{\infty} f_1(x) dx, \quad (3.8)$$

$$\bar{n}_{w_0} = T \int_0^{\infty} v \cdot f_2(w_0, v) dv, \quad (3.9)$$

$$\bar{\tau} = \frac{\int_{w_0}^{\infty} f_1(x) dx}{\int_0^{\infty} v \cdot f_2(w_0, v) dv}, \quad (3.10)$$

де $f_1(w)$ - щільність розподілу значень рівнів споживання ЕЕ, $f_2(w, v)$ - двовимірна щільність розподілу значень рівнів електроспоживання і швидкості його зміни.

Для стаціонарного процесу доцільно ввести поняття середнього числа викидів в одиницю часу

$$\bar{v}_{w_0} = \int_0^{\infty} v \cdot f_2(w_0, v) dv, \quad (3.11)$$

тобто дорівнює ймовірності «викиду» в одиницю часу.

Більше того, якщо електроспоживання $W(t)$ приймаємо як нормальною випадковою функцією, то і інтеграл (3.2) теж буде нормальним процесом, який повністю може бути охарактеризований його математичним очікуванням (3.3) і середнє квадратичним відхиленням (3.7).

Для нормального стаціонарного процесу споживання ЕЕ закон розподілу значень випадкової функції виражається через математичне очікування m_w і її дисперсію

$$\sigma_w^2 = K_w(0),$$

оскільки

$$f_1(w) = \frac{1}{\sigma_w \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(w-m_w)^2}{2 \cdot \sigma_w^2}}. \quad (3.12)$$

Швидкість зміни рівнів споживання ЕЕ та їх значень є для нормального випадкового процесу незалежними випадковими величинами. Тому двовимірний щільність розподілу значень і швидкості зміни рівнів електроспоживання розпадається на добуток нормальних щільностей значень і швидкості зміни цих рівнів:

$$f_2(w, v) = \frac{1}{\sigma_w \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(w-m_w)^2}{2 \cdot \sigma_w^2}} \cdot \frac{1}{\sigma_v \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{v^2}{2 \cdot \sigma_v^2}}. \quad (3.13)$$

Дисперсія швидкості зміни m_w дорівнює значенню кореляційної функції рівнів споживання ЕЕ в нулі, тобто

$$\sigma_v^2 = -\frac{d^2}{d\tau^2} K_w(0), \quad (3.14)$$

а математичне очікування внаслідок стаціонарності випадкового процесу дорівнює нулю

$$M[V(t)] = m_v = 0.$$

Враховуючи (3.12) згідно формули (3.8) послідовно здобуємо формулу для середнього часу перебування нормальної стаціонарної випадкової функції вище заданого рівня $w = w_0$ протягом часу T

$$\bar{t}_{w_0} = \frac{T}{\sigma_w \sqrt{2\pi}} \int_{w_0}^{\infty} e^{-\frac{(w-m_w)^2}{2\sigma_w^2}} dw = \left| \begin{array}{ll} t = \frac{w-m_w}{\sigma_w} & dw = \sigma_w dt \\ w = w_0 \Rightarrow t = \frac{w_0-m_w}{\sigma_w} & w = \infty \Rightarrow t = \infty \end{array} \right| = \frac{T}{\sqrt{2\pi}} \int_{\frac{w_0-m_w}{\sigma_w}}^{\infty} e^{-\frac{t^2}{2}} dt: \quad (3.15)$$

$$\bar{t}_{w_0} = \frac{T}{2} \left[1 - \Phi\left(\frac{w_0-m_w}{\sigma_w}\right) \right],$$

де $\Phi(x) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-\frac{t^2}{2}} dt$ – інтегральна функція Лапласа.

Далі знаходимо згідно формули (3.9) середню кількість викидів нормальної стаціонарної випадкової функції вище заданого рівня $w = w_0$ протягом часу T

$$\bar{n}_{w_0} = \frac{T}{\sigma_w \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(w_0 - m_w)^2}{2 \cdot \sigma_w^2}} \int_0^\infty v \cdot \frac{1}{\sigma_v \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{v^2}{2 \cdot \sigma_v^2}} dv = \left| \begin{array}{l} t = \frac{v^2}{2\sigma_v^2} \\ v = 0 \Rightarrow t = 0 \quad v = \infty \Rightarrow t = \infty \end{array} \right. \quad v dv = \sigma_v^2 dt \left| = \frac{T}{\sigma_w \sqrt{2\pi}} \right. \quad (3.16)$$

$$\bar{n}_{w_0} = \frac{T \sigma_v}{2\pi \sigma_w} e^{-\frac{(w_0 - m_w)^2}{2 \cdot \sigma_w^2}}.$$

В свою чергу, формула для середньої тривалості «викиду» нормальної стаціонарної випадкової функції вище заданого рівня $w = w_0$ згідно (3.15) і (3.16) прийме вигляд

$$\bar{t} = \frac{\bar{t}_{w_0}}{\bar{n}_{w_0}} = \frac{\frac{T}{2} \left[1 - \Phi \left(\frac{w_0 - m_w}{\sigma_w} \right) \right]}{\frac{T \sigma_v}{2\pi \sigma_w} e^{-\frac{(w_0 - m_w)^2}{2 \cdot \sigma_w^2}}} = \frac{\pi \cdot \sigma_w}{\sigma_v} e^{\frac{(w_0 - m_w)^2}{2 \cdot \sigma_w^2}} \left[1 - \Phi \left(\frac{w_0 - m_w}{\sigma_w} \right) \right] \quad (3.17)$$

Підстановка (3.13) в (3.11) дає формулу для середнього числа викидів в одиницю часу

$$\bar{v}_{w_0} = \frac{\sigma_v}{2\pi \sigma_w} e^{-\frac{(w_0 - m_w)^2}{2 \cdot \sigma_w^2}} \quad (3.18)$$

Здобуті результати дозволяють врахувати стохастичний характер процесу споживання ЕЕ за заданий проміжок часу.

Для більш зручного застосування здобутих вище формул представляється доцільним представити їх у безрозмірному вигляді, скориставшись теорією подібності і аналізу розмірностей [159]. Такий підхід дозволяє перетворити змінні у мультиплікативні комплекси, зменшивши кількість незалежних змінних, що спрощує дослідження. У безрозмірному вигляді формули (3.15),..., (3.18) приймають відповідно вигляд

$$\hat{t}_{\hat{w}_0} = 1 - \Phi \left(\hat{w}_0 - \hat{m}_w \right), \quad (3.15)$$

$$\hat{n}_{\hat{w}_0} = \hat{\sigma}_v e^{-\frac{(\hat{w}_0 - \hat{m}_w)^2}{2}}, \quad (3.16)$$

$$\bar{t}_{\hat{w}_0} = \frac{\pi}{\hat{\sigma}_v} e^{-\frac{(\hat{w}_0 - \hat{m}_w)^2}{2}} \left[1 - \Phi(\hat{w}_0 - \hat{m}_w) \right], \quad (3.17)$$

$$\bar{v}_{\hat{w}_0} = \frac{1}{2\pi\hat{\sigma}_w} e^{-\frac{(\hat{w}_0 - \hat{m}_w)^2}{2}}, \quad (3.18)$$

$$\text{де } \hat{t}_{\hat{w}_0} = \frac{2 \cdot \bar{t}_{w_0}}{T}, \hat{m}_w = \frac{m_w}{\sigma_w}, \hat{w}_0 = \frac{w_0}{\sigma_w}, \hat{n}_{\hat{w}_0} = \frac{\bar{n}_{w_0} \cdot 2\pi}{T}, \hat{\sigma}_v = \frac{\sigma_v}{\sigma_w}. \quad (3.19)$$

Аналіз приведених формул показує, що змінні представлені в мультиплікативній формі, тобто у вигляді поділу і добутку. Крім того, число змінних зменшилось від п'яти до трьох, що значно спрощує процедуру дослідження. Зворотній перехід від безрозмірного вигляду до розмірного доцільно проводити за формулою (3.19)

$$\bar{t}_{w_0} = \frac{T}{2} \hat{t}_{\hat{w}_0}, m_w = \sigma_w \cdot \hat{m}_w, w_0 = \sigma_w \cdot \hat{w}_0, \bar{n}_{w_0} = \frac{T}{2\pi} \hat{n}_{\hat{w}_0}, \sigma_v = \sigma_w \cdot \hat{\sigma}_v, \bar{t}_{w_0} = \bar{t}_{\hat{w}_0}, \bar{v}_{w_0} = \bar{v}_{\hat{w}_0}. \quad (3.20)$$

В якості прикладу моделювання процесу електроспоживання як стохастичного процесу розглянемо його поведінку на прикладі конкретної окремо взятої шахти Криворізького залізрудного басейна. На рис. 3.1 представлений графік рівнів електроспоживання протягом 50 годин. Аналіз графіка (рис. 3.1) підтверджує і в черговий раз показує, що потужність електроспоживання є стохастичним процесом.

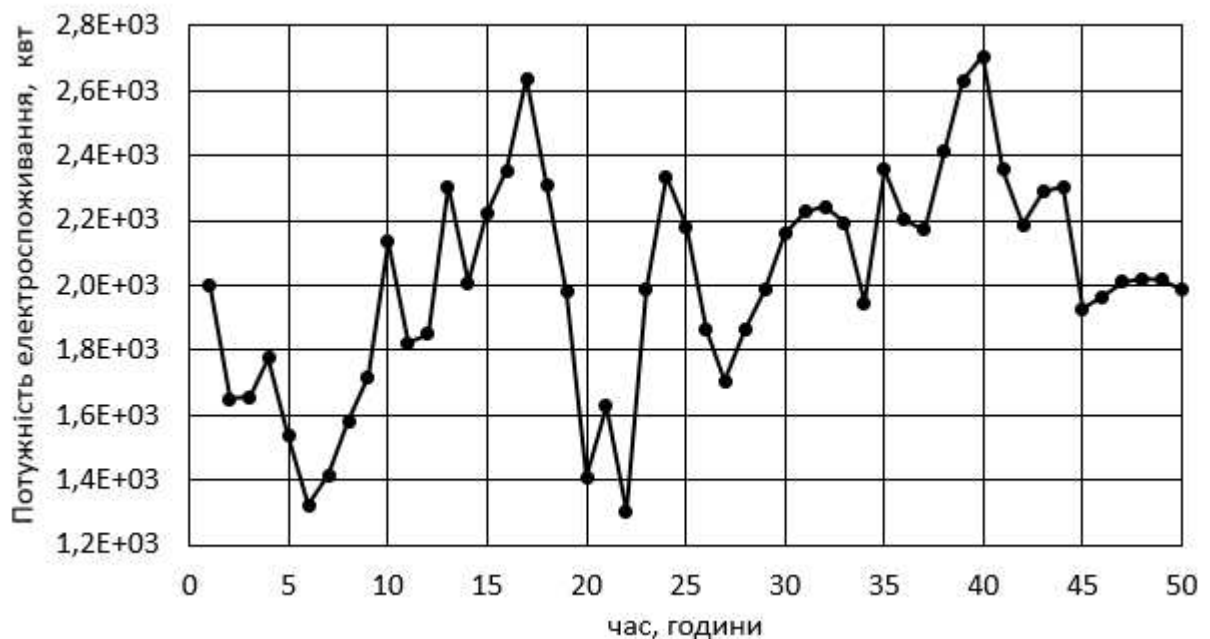


Рисунок 3.1 – Графік коливань рівнів споживання електроенергії типової діючої залізорудної шахти

Середній рівень споживання ЕЕ за визначений час (50 годин) склав величину

$$\bar{w} = \frac{1}{50} \sum_{i=1}^{50} w_i = 2017 \text{ кВт.} \quad (3.21)$$

В свою чергу, дисперсія дорівнює

$$D[W] = \frac{1}{49} \sum_{i=1}^{50} (w_i - \bar{w})^2 = 110596,5 \text{ кВт}^2 \quad (3.22)$$

Кореляційна функція процесу електроспоживання визначається формулою

$$K_w(l) = \frac{1}{50-l+1} \sum_{j=0}^{50-l} (w_j - \bar{w})(w_{j+l} - \bar{w}) (\text{кВт})^2, \quad (l=0,1,\dots,4). \quad (3.23)$$

На рис. 3.2 представлені графіки нормованої кореляційної функції, обчисленої по формулі

$$\tilde{K}_w(l) = \frac{K_w(l)}{D[W]} \quad (3.24)$$

і апроксимацію цієї функції формулою

$$\tilde{K}_w^a(\tau) = e^{-\alpha \cdot |\tau|} (1 + \alpha \cdot |\tau|). \quad (3.25)$$

Застосування метода найменших квадратів до ординат статистичної нормованої кореляційної функції (3.23) дозволило знайти величину параметра в формулі (3.25), який дорівнює

$$\alpha = 1.4. \quad (3.26)$$

В результаті формула (3.25) приймає вигляд

$$\tilde{K}_w^a(\tau) = e^{-1.4 \cdot |\tau|} (1 + 1.4 \cdot |\tau|). \quad (3.27)$$

Аналіз розташування графіків на рис.3.2 показує досить задовільне їх наближення.

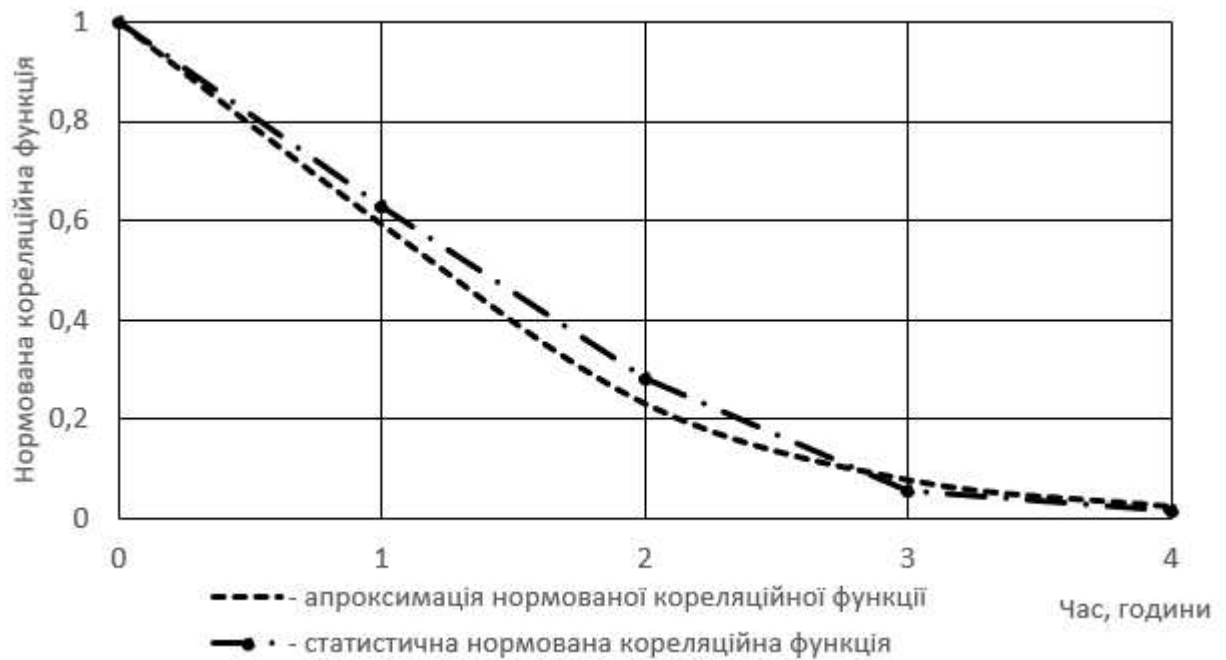


Рисунок 3.2 – Графіки статистичної нормованої кореляційної функції (3.22) і її апроксимація формулою (3.25)

Для підтвердження цього висновку був обчислений індекс детермінації по формулі

$$R^2 = 1 - \frac{S_a^2}{D[\tilde{K}_w]} \quad , \quad (3.28)$$

$$\text{де } S_a^2 = \frac{1}{4} \sum_{l=0}^4 (\tilde{K}_w(l) - e^{-1.4 \cdot l} (1 + 1.4 \cdot l))^2 .$$

Обчислення по формулі (3.27) з урахуванням чисельних результатів дало величину

$$R^2 = 1 - \frac{0,00108}{0,1731} = 0,994 \quad . \quad (3.29)$$

Величина індексу детермінації (3.29), дозволяє стверджувати, що, згідно шкалі Чеддока, має місце вельми висока сила зв'язку між змінними [160].

Дослідження статистичного матеріалу процесу споживання ЕЕ по ряду шахт Криворізького залізорудного басейну, в тому числі тієї, котра була зазначена попередю, показало, що має місце нормальний стаціонарний стохастичний процес з параметрами, які визначаються формулами (3.19) і

(3.20). В результаті формула щільності розподілу рівнів споживання ЕЕ запишеться у вигляді

$$f_1(w) = \frac{1}{332,56\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(w-2017)^2}{2 \cdot 110596,5}} \quad (3.30)$$

Це дозволяє застосувати приведені вище розрахункові формули.

Враховуючи (3.20) і (3.25), формула для обчислення кореляційної функції електроспоживання має вигляд

$$K_w(\tau) = 110596,5 \cdot e^{-1,4 \cdot |\tau|} (1 + 1,4 \cdot |\tau|). \quad (3.31)$$

Тоді дисперсія швидкості зміни рівнів електроспоживання обчислюється так

$$\sigma_v^2 = -\frac{d^2}{d\tau^2} K_w(0) = \sigma_w^2 \cdot \alpha^2. \quad (3.32)$$

З врахуванням чисельних значень (3.20) і (3.24) будемо мати

$$\sigma_v^2 = 110596,5 \cdot 1,4^2 = 216769,1 \quad (3.33)$$

Для знаходження середнього часу перебування значень рівнів споживання ЕЕ вище заданого рівня, скористаємось формулою (3.15) з урахуванням (3.21) і (3.22)

$$\hat{t}_{\hat{w}_0} = 1 - \Phi(\hat{w}_0 - 6,1) \quad (3.34)$$

На рис. 3.3 представлений графік залежності безрозмірного середнього часу перебування значення рівнів електроспоживання вище заданого безрозмірного рівня (3.34). Аналіз графіка показує, що у безрозмірному вигляді при зростанні рівня споживання ЕЕ середній час перебування цього поточного показника знаходиться або вище цього рівня, або зменшується.

Для переходу до розмірних величин скористаємось формулами (3.20). Нехай:

$$\hat{w}_0 = 6,6, \quad (3.35)$$

тоді, згідно функції (3.34) і графіку рис.3.3 має місце

$$\hat{t}_{\hat{w}_0} = 0,62. \quad (3.36)$$

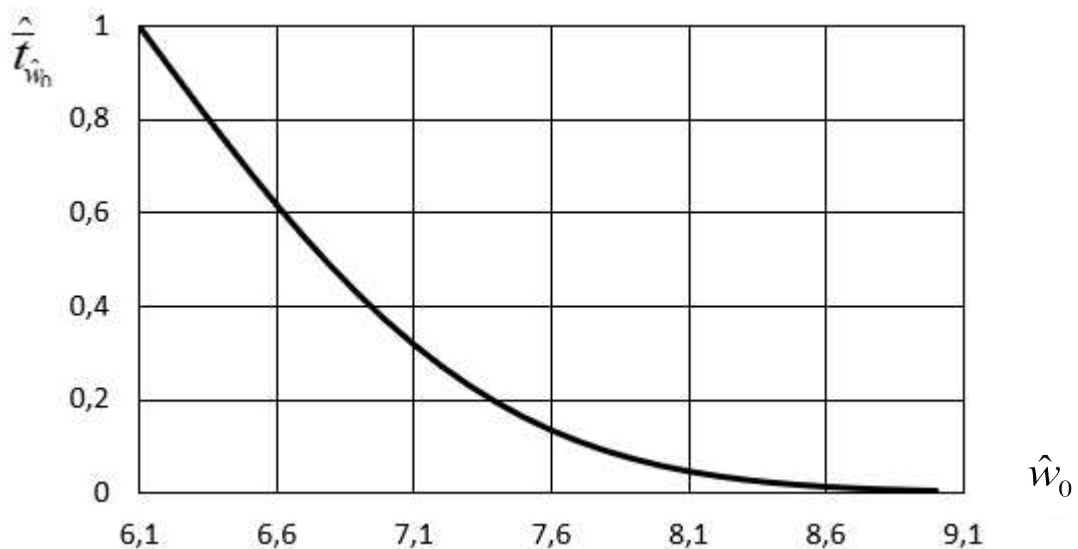


Рисунок 3.3 – Графік залежності у безрозмірного вигляді середнього часу перебування значень рівнів споживання електроенергії вище заданого рівня

Якщо прийняти, що час спостереження дорівнює добі, тобто $T = 24$ год, а $\sigma_w = 332,56$ кВт, то середній час перебування поточних рівнів споживання ЕЕ протягом доби вище $w_0 = 2195$ кВт буде становити $\bar{t}_{2195} = 12 \cdot 0,62 = 7,44$ год.

Для знаходження середньої кількості «викидів» вище заданого рівня електроспоживання скористаємось формулою (3.16), яка згідно (3.21), приймає вигляд

$$\hat{n}_{\hat{w}_0} = \hat{\sigma}_v e^{-\frac{(\hat{w}_0 - 6,1)^2}{2}}. \quad (3.37)$$

На рис. 3.4 представлені графіки функції (3.37). В якості параметра вибране середньоквадратичне відхилення швидкості зміни рівнів споживання ЕЕ. Аналіз графіків, приведених на рис. 3.4, показує, що при зростанні заданого рівня електроспоживання середнє число «викидів» зменшується, але при зростанні цього показника середнє квадратичного відхилення швидкості зміни процесу споживання ЕЕ середнє число «викидів» зростає.

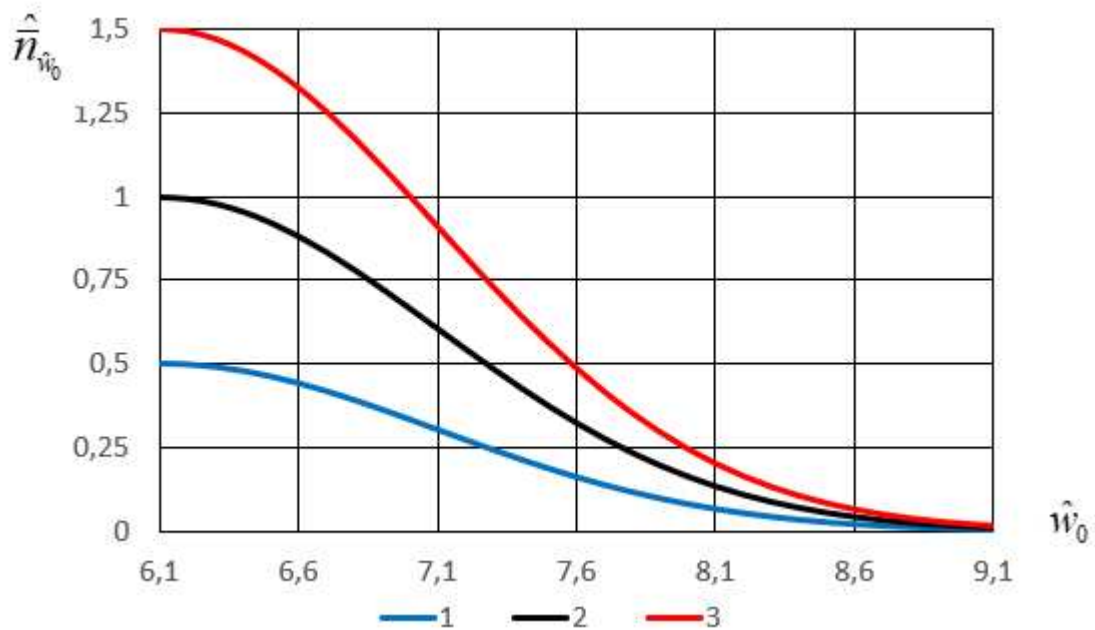


Рисунок 3.4 – Графіки залежності у безрозмірному вигляді середньої кількості викидів вище заданого рівня рівнів споживання електроенергії від заданого рівня (1- $\hat{\sigma}_v=0,5$; 2- $\hat{\sigma}_v=1$; 3- $\hat{\sigma}_v=1,5$)

Якщо прийняти, що час спостереження дорівнює добі, тобто $T = 24$ год, а $\sigma_w = 332,56$ кВт і $\sigma_v = 465,6$ кВт/год, то середнє число викидів протягом доби вище заданого рівня споживання ЕЕ $w_0 = 2195$ кВт буде становити

$$\bar{n}_{2195} = \frac{24}{2\pi} \cdot 0,8825 = 3,37 \approx 3$$

В свою чергу, для знаходження середньої тривалості «викиду» скористаємось формулою (3.17), яка з урахуванням (3.21), прийме вигляд

$$\bar{\tau}_{\hat{w}_0} = \frac{\pi}{\hat{\sigma}_v} e^{\frac{(\hat{w}_0 - 6,1)^2}{2}} [1 - \Phi(\hat{w}_0 - 6,1)] . \quad (3.38)$$

На рис. 3.5 представлені у безрозмірному вигляді графіки залежності середньої тривалості «викиду» вище заданого рівня споживання ЕЕ від заданого рівня, згідно формули (3.38). Аналіз приведених графіків показує, що з зростом величини заданого рівня споживання ЕЕ середня тривалість «викиду» вище заданого рівня зменшується. Крім того, при зростанні середнє квадратичного відхилення швидкості зміни потужності електроспоживання,

як параметра, середня тривалість викидів вище заданого рівня споживання ЕЕ зменшується.

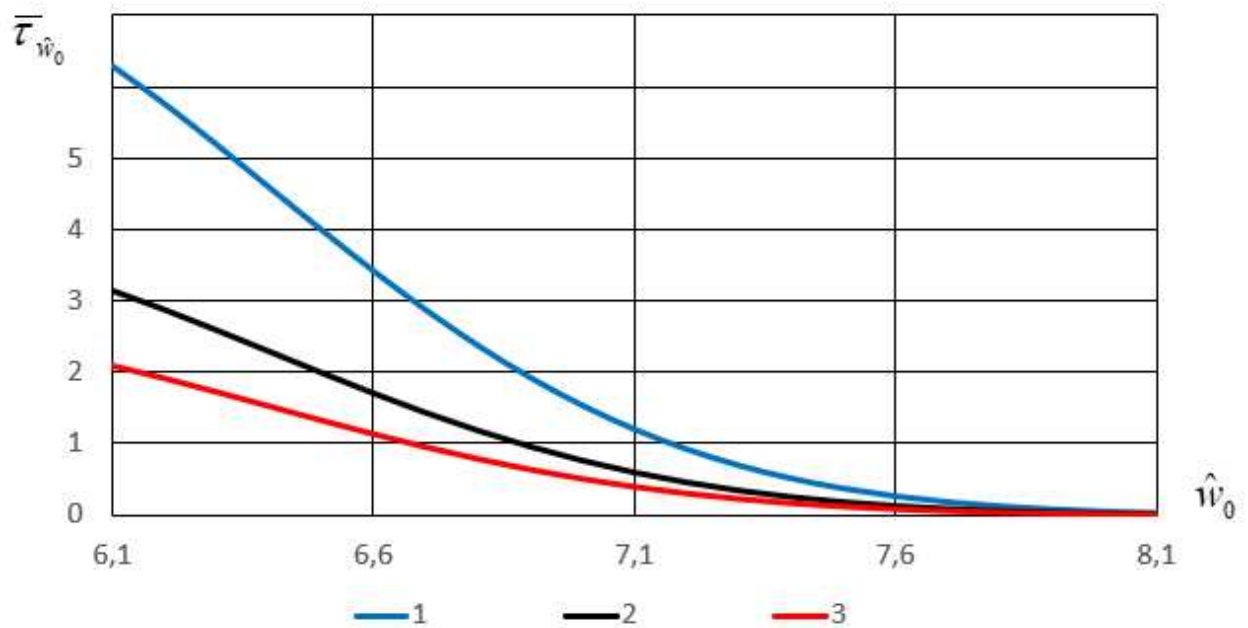


Рисунок 3.5 – Графіки залежності у безрозмірному вигляді середньої тривалості викидів вище заданого рівня споживання електроенергії від заданого рівня (1- $\hat{\sigma}_v=0,5$; 2- $\hat{\sigma}_v=1$; 3- $\hat{\sigma}_v=1,5$)

Якщо прийняти, що час спостереження дорівнює добі, тобто $T=24$ год, а $\sigma_w=332,56$ кВт і $\sigma_v=465,6$ кВт/год, то середнє число викидів протягом доби вище рівня потужності електроспоживання $w_0=2195$ кВт буде становити $\bar{\tau}_{2195}=1,71$ год.

Зрештою, розглянемо процес електроспоживання за визначений час, згідно формулам (3.3) і (3.6). Враховуючи (3.21), маємо

$$m_q(T)=m_w \cdot T=2017 \cdot T \text{ кВт} \cdot \text{год.} \quad (3.38)$$

В свою чергу,

$$D[Q(T)]=2\sigma_w^2 \int_0^T (T-\tau) \cdot e^{-\alpha \cdot \tau} (1+\alpha \cdot \tau) d\tau = \frac{2\sigma_w^2}{\alpha^2} \left[3(e^{-\alpha \cdot T} - 1) + \alpha T (2 + e^{-\alpha \cdot T}) \right].$$

Згідно (2.22) і (2.31), маємо

$$D[Q(T)]=1,1285 \cdot 10^5 \cdot \left[3(e^{-1,4 \cdot T} - 1) + 1,4 \cdot T \cdot (2 + e^{-1,4 \cdot T}) \right],$$

або

$$\sigma[Q(T)] = 335,93 \cdot \sqrt{3(e^{-1,4 \cdot T} - 1) + 1,4 \cdot T \cdot (2 + e^{-1,4 \cdot T})} . \quad (3.39)$$

На рис.3.6 представлені графіки споживання ЕЕ згідно формули (3.38) з урахуванням середньо квадратичного відхилення (39) протягом доби.

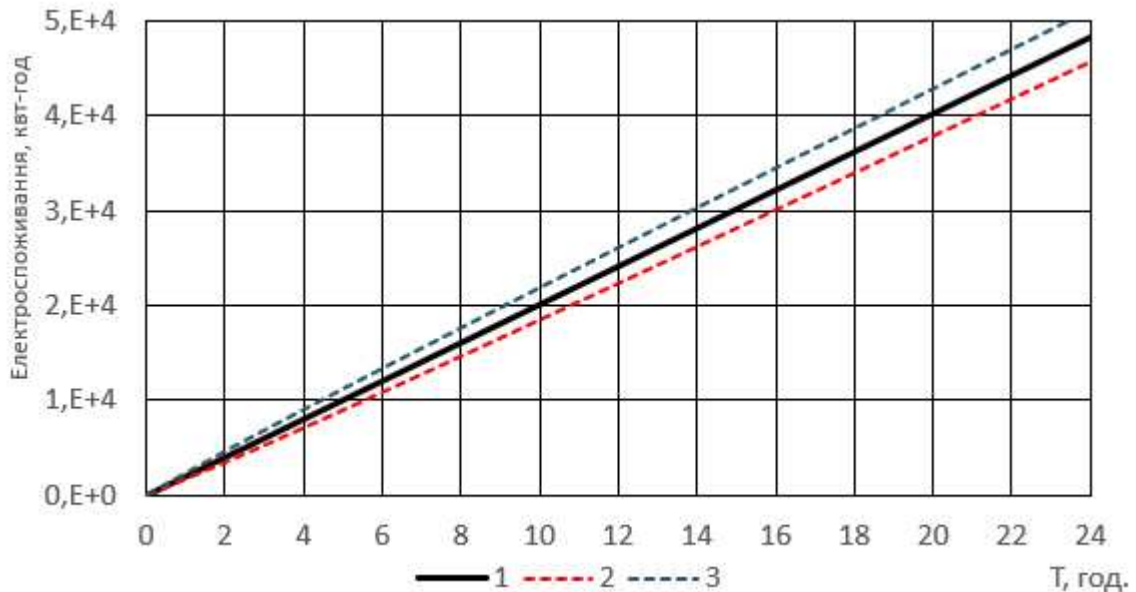


Рисунок 3.6 – Графіки споживання електроенергії протягом доби: 1 – середнє електроспоживання, 2 – електроспоживання, зменшене на середнє квадратичне відхилення (3.39), 3 – електроспоживання, збільшене на середнє квадратичне відхилення (3.39)

Аналіз графіків, приведених на рис. 3.6, показує, що з зростанням часу середній рівень споживання ЕЕ зростає. Разом з цим, лінійно зростає відхилення рівнів споживання ЕЕ від середнього рівня за рахунок середньоквадратичного відхилення (3.39), досягаючи максимуму для кінцевого часу доби.

Якщо визначений час дорівнює добі, тобто $T = 24$ год, то згідно (3.38) і (3.39), маємо $m_q(24) = m_w \cdot 24 = 2017 \cdot 24 = 4,8408 \cdot 10^4$ кВт·год, $\sigma[Q(24)] = 2692$ кВт·год.

Таким чином, здобуті формули дозволяють провести повне дослідження процесу споживання ЕЕ як нормального стохастичного процесу в рамках кореляційної теорії [157].

Дослідження електроспоживання як стохастичного процесу дозволило шляхом використання статистичного матеріалу по ряду шахт Криворізького залізорудного басейну побудувати математичну модель.

По синтезованій моделі були визначені такі стохастичні характеристики процесу електроспоживання як середні і дисперсії, середній час перебування рівнів споживання ЕЕ як стаціонарної випадкової функції вище заданого рівня $w = w_0$ протягом часу T , середньої кількості «викидів» електроспоживання за цей проміжок часу та середньої тривалості викиду.

3.2 Статистичний аналіз часових рядів електроенергетичного комплексу електропостачання – електроспоживання залізорудних шахт

Визначаючи стохастичність, як одну з властивостей комплексу: постачання – споживання електроенергії – видобуток ЗР, вважаємо за доцільне провести дослідження в напрямку побудови стохастичних моделей для часових рядів у часовій області та прикладного застосування означених моделей. Очевидно, в разі дискретної зміни часу, часовий ряд є дискретний [157, 175]. Спостереження дискретного часового ряду, зроблені у моменти часу $t_1, t_2, \dots, t_i, \dots, t_N$, можуть бути позначені $z(t_1), z(t_2), \dots, z(t_i), \dots, z(t_N)$. Якщо спостереження робляться через фіксований інтервал часу Δt і $i \in N$ послідовних значень спостережень ряду, можна записати $z_1, z_2, \dots, z_i, \dots, z_N$, позначаючи спостереження, зроблені в рівновіддалені моменти часу $t_0 + \Delta t, t_0 + 2\Delta t, \dots, t_0 + i \cdot \Delta t, \dots, t_0 + N\Delta t$. Далі, значення t_0 і Δt не суттєві, але якщо існує необхідність достовірно встановити спостереження, то варто розкрити їх значення. В разі можемо прийняти t_0 за початок відліку часу, тобто $t_0 = 0$, а Δt за одиницю часу, $\Delta t = 1$, то z_i розглядається як відслідкування в i -й момент часу.

Однією з важливих прикладних завдань є прогнозування майбутніх значень часового ряду за його поточними та минулими значеннями. На практиці завжди існує необхідність у прогнозі «наперед» на інтервал, що називається часом попередження [157, 176]. Головна особливість у розробці

моделей стохастичних часових рядів – припущення про стаціонарність. Стаціонарний стохастичний часовий ряд зручно описувати його середнім значенням, дисперсією та автокореляційною функцією. Для оцінки середнього значення дискретного стохастичного процесу можна скористатися формулою:

$$\bar{z} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N z_i, \quad (3.40)$$

де $z_1, z_2, \dots, z_N$ – значення часового ряду.

Логічним є застосування дисперсії дискретного стохастичного процесу. Оцінювання за допомогою вибіркової дисперсії розраховується за формулою

$$\sigma_z^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (z_i - \bar{z})^2. \quad (3.41)$$

Оцінювання зв'язку між значеннями часового ряду проводиться з використанням автокореляції із затримкою k , яка дорівнює

$$\rho_k = \frac{1}{(N-1) \cdot \sigma_z^2} \sum_{i=1}^{N-k} (z_i - \bar{z})(z_{i+k} - \bar{z}). \quad (3.42)$$

Дискретні часові ряди, в яких послідовні значення є залежними, природно розглядати як генеровані послідовністю незалежних імпульсів a_i . Ці імпульси – реалізація випадкових величин з нормальним розподілом з нульовим середнім та дисперсією σ_a^2 . Послідовність випадкових величин $a_i, a_{i-1}, \dots$ має назву «білий шум». «Білий шум» a_i можна трансформувати в процес, що вивчається, z_i за допомогою лінійного фільтра. Операція фільтрації полягає у обчисленні зваженої суми відслідкування обрахованих раніше, наступним чином:

$$z_i = \bar{z} + a_i + \psi_1 \cdot a_{i-1} + \psi_2 \cdot a_{i-2} + \dots \quad (3.43)$$

де $\psi_1, \psi_2, \dots$ послідовність «ваг» фільтра.

Білий шум можна розглядати як серію імпульсів, яка складається з послідовності некорельованих випадкових змінних з нульовим середнім значенням та постійною дисперсією

$$\bar{a} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N a_i = 0, \quad D[a] = \sigma_a^2. \quad (3.44)$$

Так як випадкові змінні некорельовані, то автокореляційна функція білого шуму запишеться у вигляді

$$\rho_k = \begin{cases} 1, & k=0, \\ 0, & k \neq 0. \end{cases} \quad (3.45)$$

Якщо розглядаються дві змінні, одна із яких є вхідна x_i , а друга – вихідна y_i , то вони можуть бути зв'язані лінійним фільтром

$$y_i = k \cdot x_i + k_1 \cdot x_{i-1} + k_2 \cdot x_{i-2} + \dots, \quad (3.46)$$

де $k, k_1, k_2, \dots$ – послідовність ваг.

Згідно з проводимим дослідженням структура функції (3.46) визначається її статичною частиною, тобто має вигляд

$$y_i = k \cdot x_i, \quad i=1, 2, \dots, N \quad (3.47)$$

Враховуючи, що число рівнянь в (3.47) більше числа невідомих ($N > 1$) маємо систему із N рівнянь із одним невідомим k . Зрозуміло, що така система рівнянь є несумісна. Цю систему (3.47) можна розв'язати за допомогою МНК [161], тобто шляхом мінімізації функції сумарної нев'язки у вигляді суми квадратів нев'язок кожного з рівнянь (3.47)

$$F(k) = \sum_{i=1}^N (y_i - k \cdot x_i)^2 \rightarrow \min_k. \quad (3.48)$$

Простий вигляд функції (3.47) дозволяє вирішити задачу мінімізації (3.48), прирівнюючи похідну нулю функції (3.48), тобто

$$\frac{dF(k)}{dk} = 0. \quad (3.49)$$

Так як функція (3.47) є лінійною щодо параметра, то $F(k)$ – квадратична функція, чим і обумовлюється лінійність рівняння (3.49). Дійсно, обчислюючи похідну в (3.49), послідовно маємо

$$\frac{dF(k)}{dk} = -2 \sum_{i=1}^N (y_i - k \cdot x_i) \cdot x_i = 0, \quad \sum_{i=1}^N (y_i \cdot x_i - k \cdot x_i^2) = 0, \quad k \cdot \sum_{i=1}^N x_i^2 = \sum_{i=1}^N y_i \cdot x_i \quad (3.50)$$

З останнього рівняння знаходимо оптимальну величину параметра

$$k_0 = \frac{\sum_{i=1}^N y_i \cdot x_i}{\sum_{i=1}^N x_i^2} \quad (3.51)$$

Таким чином, згідно (3.47) і (3.51) математична модель представиться у вигляді

$$\hat{y} = k_0 \cdot x. \quad (3.52)$$

Здобута модель (3.52) дозволяє визначити кількісну залежність вихідної змінної від вхідної змінної.

Для аналізу якості зв'язку змінних в моделі (3.47) з урахуванням (3.51) доцільно скористатися шкалою Чеддока [161], яка дозволяє на основі величини коефіцієнта кореляції встановити якісний характер зв'язку між змінними. Нижче в табл. 3.1 приведена шкала Чеддока.

Таблиця 3.1 – Шкала Чеддока

Коефіцієнт кореляції	0,1-0,3	0,3-0,5	0,5-0,7	0,7-0,9	0,9-0,99
Зв'язок	слабка	помірна	помітна	висока	дуже висока

Коефіцієнт кореляції обчислюється по формулі

$$r = \sqrt{1 - \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - k_0 \cdot x_i)^2}{\sum_{i=1}^N y_i^2}}. \quad (3.53)$$

Далі згідно шкали Чеддока [162] робиться висновок про силу зв'язку між змінними.

Нижче розглянуто застосування статистичних методів до аналізу реальних даних. Приведені дані представляють собою часові ряди з інтервалом $\Delta t = 6$ годин. Крім цього, треба підкреслити, що величини часових

рядів утворювались шляхом накопичення цих змінних протягом заданого інтервалу.

В табл. 3.2 представлені розрахункові дані по шахті №1 на ДПП (1 трансформатор).

Математична модель в даному випадку, згідно (3.47), має вигляд

$$v_i = k \cdot p_i, i = (1, 2, \dots, 28) . \quad (3.54)$$

Величину параметра k знаходимо по формулі (3.51)

$$k_0 = \frac{\sum_{i=1}^N v_i \cdot p_i}{\sum_{i=1}^N p_i^2} . \quad (3.55)$$

Згідно даних, приведених в останньому рядку табл.3.1, по формулі (3.55) знаходимо

$$k_0 = \frac{17255321}{8952023} = 1,928 \quad (3.56)$$

Коефіцієнт кореляції знаходимо по формулі (3.53), згідно даних в останньому рядку табл. 3.2

$$r = \sqrt{1 - \frac{\sum_{i=1}^{28} (v_i - 1,928 \cdot p_i)^2}{\sum_{i=1}^{28} v_i^2}} = \sqrt{1 - \frac{3687660}{36947861}} = 0,949 . \quad (3.57)$$

Згідно шкалі Чеддока [162] величина коефіцієнта кореляції (3.57) вказує на дуже високий зв'язок між змінними, тобто математична модель

$$v_m = 1,928 \cdot p \quad (3.58)$$

є адекватною.

Таблиця 3.2 - Аналітико-розрахункова таблиця математичної моделі процесу споживання електроенергії для умов шахти №1 на ДПП (1 трансформатор)

№	p_i , кВт·год	v_i , тони	p_i^2	$v_i \cdot p_i$	Мо-дель $v_{m,i} = k_0 \cdot p$	v_i^2	$(v_i - v_{m,i})^2$
1	440	850	193600	374000	848.3	722500	2.8224
2	585.6	800	342927.4	468480	1129.0	640000	108265.2
3	648.7	1524	420811.7	988618.8	1250.7	2322576	74696.39
4	620.1	1098	384524	680869.8	1195.6	1205604	9516.549
5	755.9	1211	571384.8	915394.9	1457.4	1466521	60700.74
6	661.2	1470	437185.4	971964	1274.8	2160900	38105.54
7	557.2	595	310471.8	331534	1074.3	354025	229710.9
8	294.5	774	86730.25	227943	567.8	599076	42520.09
9	508	860	258064	436880	979.4	739600	14262.09
10	500.5	1596	250500.3	798798	965.0	2547216	398206.4
11	483.6	921	233869	445395.6	932.4	848241	129.5226
12	711.3	1452	505947.7	1032808	1371.4	2108304	6498.553
13	562.8	838	316743.8	471626.4	1085.1	702244	61047.74
14	773.1	1354	597683.6	1046777	1490.5	1833316	18642.3
15	546.1	1764	298225.2	963320.4	1052.9	3111696	505690.5
16	417.1	668	173972.4	278622.8	804.2	446224	18541.94
17	517.9	1403	268220.4	726613.7	998.5	1968409	163611.2
18	531.8	1039	282811.2	552540.2	1025.3	1079521	187.4051
19	457.9	847	209672.4	387841.3	882.8	717409	1283.875
20	571	1280	326041	730880	1100.9	1638400	32081.11
21	583.7	1664	340705.7	971276.8	1125.4	2768896	290118.4
22	428	1363	183184	583364	825.2	1857769	289246
23	732.7	336	536849.3	246187.2	1412.6	112896	1159166
24	528.2	1139	278995.2	601619.8	1018.4	1297321	14551.69
25	610.2	974	372344	594334.8	1176.5	948676	40992.32
26	451.5	1011	203852.3	456466.5	870.5	1022121	19742.5
27	585.4	844	342693.2	494077.6	1128.7	712336	81026.31
28	473.3	1008	224012.9	477086.4	912.5	1016064	9115.972
Середнє	554.9	1095.8					
Дисперсія	12234.1	123139.7					
Сума			8952023	17255321		36947861	3687660

На рис. 3.7 і 3.8 представлено графіки даних табл. 3.2.

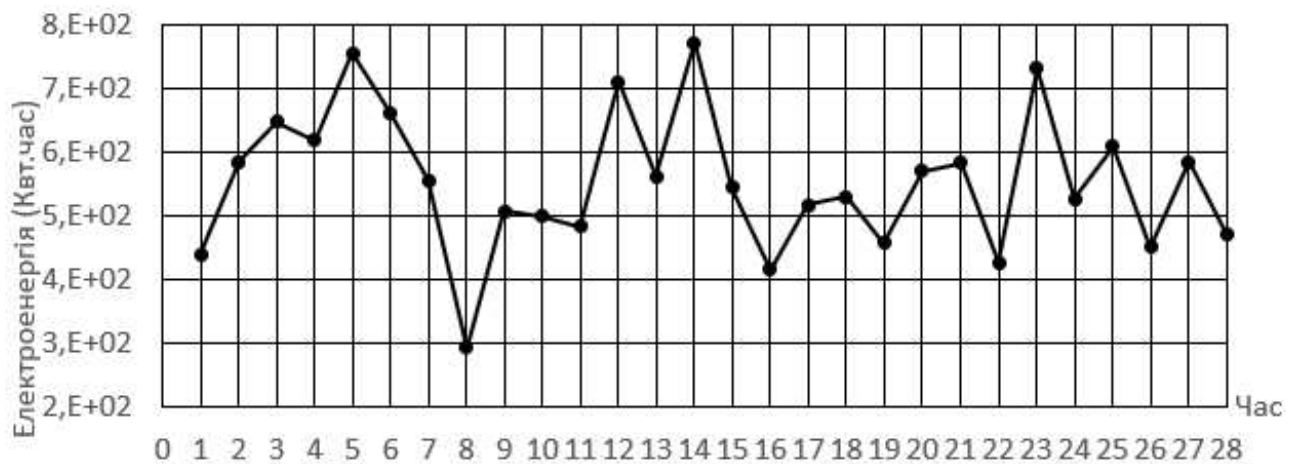


Рисунок 3.7 – Графік залежності величини рівнів споживання електроенергії від часу

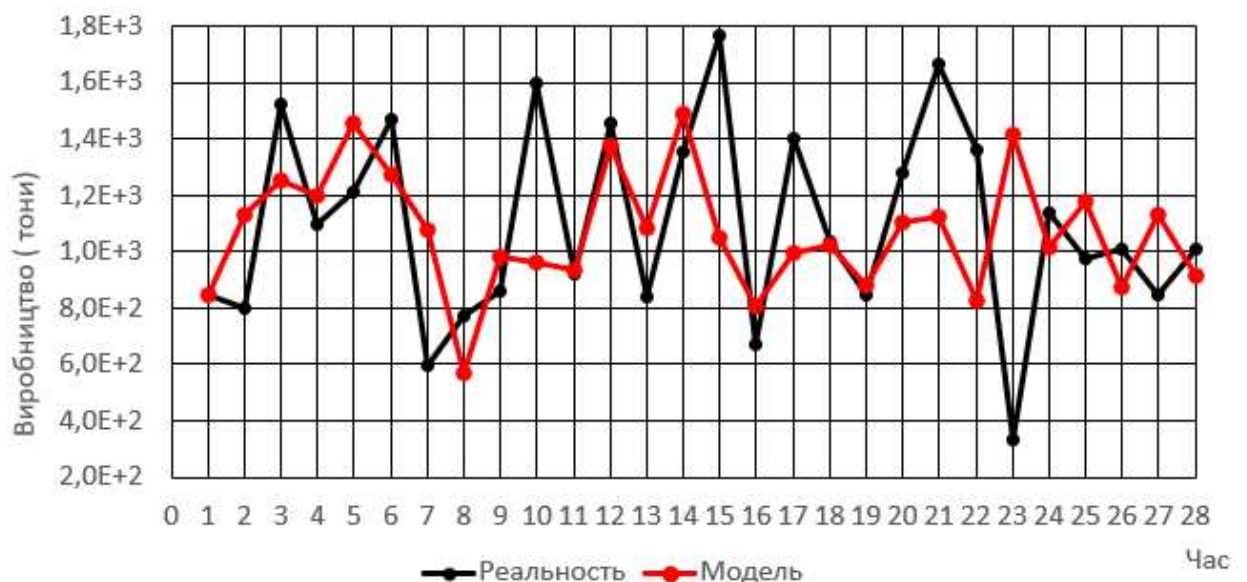


Рисунок 3.8 – Графік залежності обсягів видобутку залізної руди і його моделі від часу

На рис. 3.8 чорним та червоним кольорами представлені графіки залежності обсягів видобутку ЗР і його моделі від часу. Аналіз приведених графіків підтверджує результати про адекватність математичної моделі, які здобуті аналітично.

Далі проведемо дослідження на стохастичність часових рядів, які утворені електроенергією, що витрачається на відповідний обсяг виробництва.

Аналіз графіка залежності обсягів споживання електроенергії від часу, який представлений на рис.3.7, вказує на його стохастичність. В табл. 3.2 представлені в останніх строках його середнє і дисперсія

$$\bar{p}=554,9 \text{ кВт}\cdot\text{год}, \quad D[P]=12234,1 \text{ кВт}\cdot\text{год}^2. \quad (3.58)$$

Для повної характеристики часового ряду треба встановити зв'язок між його членами, тобто обчислити автокореляційну функцію згідно формули (3.2)

$$\rho_k = \frac{1}{(28-1) \cdot 12234,1} \sum_{i=1}^{28-k} (p_i - 554,9)(p_{i+k} - 554,9), \quad (3.59)$$

$$k=0,1,2,\dots,5.$$

Перші 5 значень вибіркової автокореляції приведені в табл. 3.3 і показані на рис. 3.9.

Таблиця 3.3 – Вибіркові значення автокореляції

k	0	1	2	3	4	5
ρ_k	1	-0,021	0,092	-0,230	-0,364	-0,378

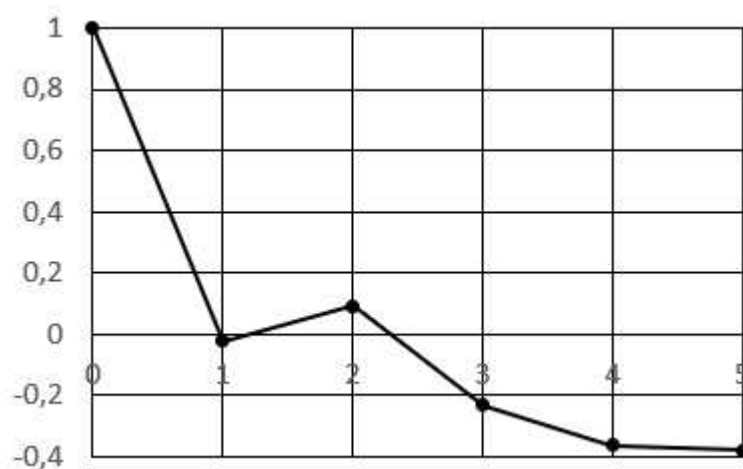


Рисунок 3.9 – Автокореляційна функція даних щодо рівнів постачання електроенергії шахти №1 (1 трансформатор)

Аналіз автокореляційної функції показує, що величини споживання електроенергії практично не залежать одна від одної, тобто є білим шумом. Внаслідок цього, математична модель стохастичного часового ряду приймає вигляд

$$p_i = 554.9 + a_i, \quad (i = 1, 2, \dots, 28), \quad (3.59)$$

де $\bar{a} = 0$, $\sigma_a^2 = 12234,1$.

Аналогічно проводиться аналіз на стохастичність часового ряду видобутку ЗР. В табл. 3.2 представлені в останніх рядках його середнє і дисперсія

$$\bar{v} = 1095,8 \text{ тони}, \quad D[V] = 123139,7 \text{ тони}^2. \quad (3.60)$$

Для повної характеристики часового ряду треба встановити зв'язок між його членами, тобто обчислити автокореляційну функцію згідно формулі (3.42)

$$\rho_k = \frac{1}{(28-1) \cdot 123139,7} \sum_{i=1}^{28-k} (v_i - 1095,8)(v_{i+k} - 1095,8), \quad (3.61)$$

$$(k = 0, 1, 2, \dots, 5).$$

Перші 5 значень вибіркової автокореляції приведені в табл. 3.4 і показані на рис. 3.10.

Таблиця 3.4 – Вибіркові значення автокореляції

k	0	1	2	3	4	5
ρ_k	1	-0,187	-0,132	0,016	-0,052	0,047

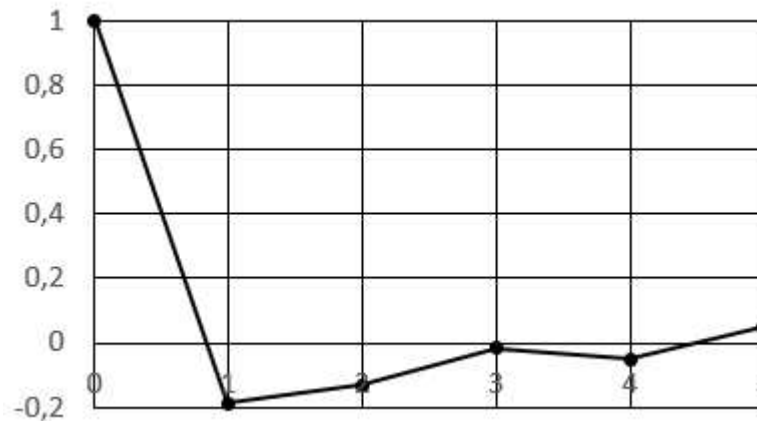


Рисунок 3.10 – Автокореляційна функція даних щодо обсягів видобутку залізної руди шахти №1 (1 трансформатор)

Аналіз автокореляційної функції показує, що величини видобутку ЗР практично не залежать одна від одної, тобто є білим шумом. Внаслідок цього, математична модель стохастичного часового ряду приймає вигляд

$$v_i = 1095.8 + a_i, \quad (i = 1, 2, \dots, 28), \quad (3.62)$$

де $\bar{a} = 0$, $\sigma_a^2 = 123139.7$.

Аналогічно проводиться аналіз даних відповідно шахти №1 на ДПП (2 трансформатори). В табл. 3.5 представлені відповідні дані.

Згідно даних, приведених в останній строчці табл. 3.5, за формулою (3.16) знаходимо

$$k_0 = \frac{167860}{62692} = 2.678. \quad (3.63)$$

Коефіцієнт кореляції знаходимо по формулі (3.53), згідно даних в останній строчці табл. 3.5.

$$r = \sqrt{1 - \frac{\sum_{i=1}^{21} (v_i - 2.678 \cdot p_i)^2}{\sum_{i=1}^{21} v_i^2}} = \sqrt{1 - \frac{52922}{502368}} = 0.946. \quad (3.64)$$

Таблиця 3.5 – Аналітико-розрахункова таблиця математичної моделі щодо шахти №1 на ДПП (2 трансформатор)

№	p_i , КВт.-час	v_i , тони	p_i^2	$v_i \cdot p_i$	Модель $v_{m,i} = k_0 \cdot p_i$	v_i^2	$(v_i - v_{m,i})^2$
1	70.7	128	4998.49	9049.6	189.3	16384	3761.9
2	44.8	64	2007.04	2867.2	120.0	4096	3133.1
3	73.9	168	5461.21	12415.2	197.9	28224	894.3
4	51.4	168	2641.96	8635.2	137.6	28224	921.2
5	73.8	152	5446.44	11217.6	197.6	23104	2082.7
6	63	208	3969	13104	168.7	43264	1543.4
7	52	40	2704	2080	139.3	1600	9851.8
8	46.1	32	2125.21	1475.2	123.5	1024	8364.2
9	4.6	0	21.16	0	12.3	0	151.8
10	30.6	112	936.36	3427.2	81.9	12544	903.2
11	21.6	88	466.56	1900.8	57.8	7744	909.3
12	78.4	240	6146.56	18816	210.0	57600	902.7
13	50.6	144	2560.36	7286.4	135.5	20736	72.1
14	64.2	268	4121.64	17205.6	171.9	71824	9229.9
15	58.3	160	3398.89	9328	156.1	25600	15.0
16	34.3	48	1176.49	1646.4	91.9	2304	1923.3
17	64.2	216	4121.64	13867.2	171.9	46656	1942.4
18	62.6	168	3918.76	10516.8	167.6	28224	0.1
19	35.1	96	1232.01	3369.6	94.0	9216	4.0
20	46.1	160	2125.21	7376	123.5	25600	1335.5
21	55.8	220	3113.64	12276	149.4	48400	4979.8
Середнє	51.53	137.1					
Дисперсія	346.68	5369.8					
Сума			62693	167860		502368	52922

Величина коефіцієнта кореляції (3.64) вказує на дуже високий зв'язок між змінними, тобто математична модель.

$$v_m = 2,678 \cdot p \quad (3.65)$$

є адекватною.

На рис. 3.11 і 3.12 представлено графіки даних табл. 3.5.

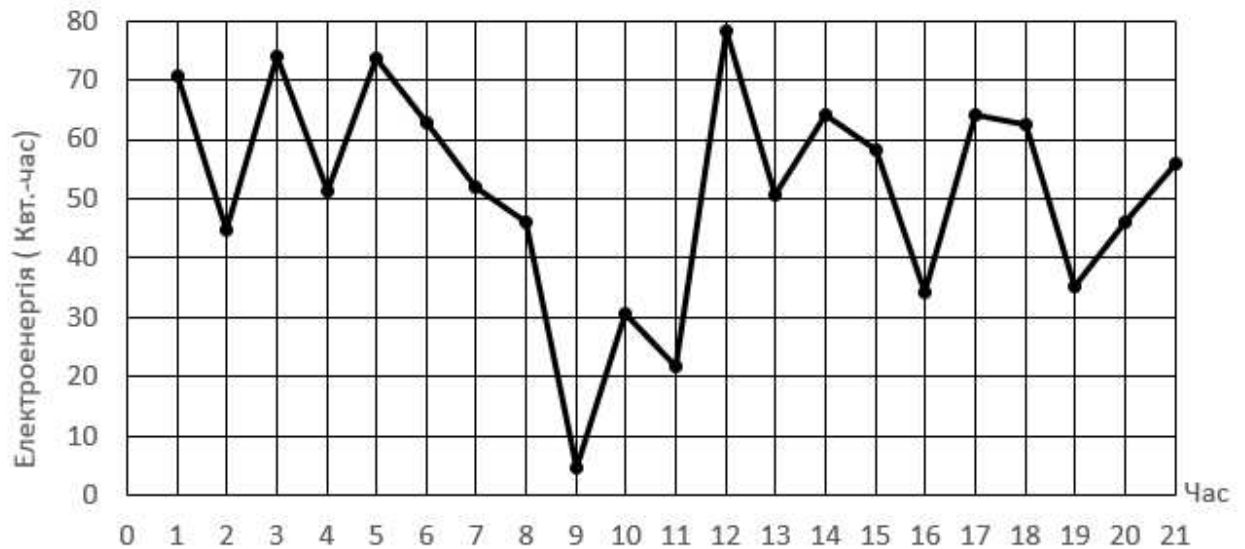


Рисунок 3.11 – Графік залежності обсягів споживання електроенергії від часу шахти №1(2 трансформатор)

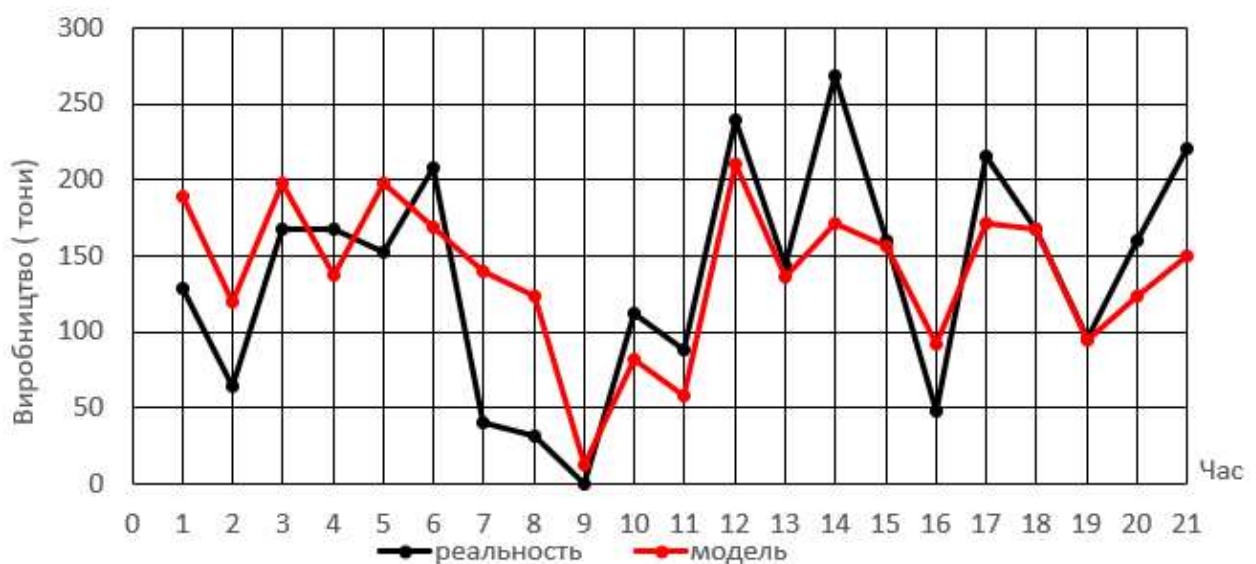


Рисунок 3.12 – Графік залежності обсягів видобутку залізної руди і його моделі від часу шахти №1 (2 трансформатор)

На рис. 3.12 чорним та червоним кольорами представлені графіки залежності виробництва і його моделі від часу. Аналіз приведених графіків підтверджує результати про адекватність математичної моделі, які здобуті аналітично.

Далі досліджуємо на стохастичність часові ряди, утворені витрачаємою електроенергією і об'ємом виробництва.

Аналіз графіка залежності електроенергії від часу, який представлений на рис. 3.11, вказує на його стохастичність. В табл. 3.5 представлені в останніх строках його середнє і дисперсія

$$\bar{p}=51,5 \text{ кВт}\cdot\text{год}, \quad D[P]=346,7 \text{ кВт}\cdot\text{год}^2. \quad (3.66)$$

Для повної характеристики часового ряду треба встановити зв'язок між його членами, тобто обчислити автокореляційну функцію згідно формулі (3.42)

$$\rho_k = \frac{1}{(21-1) \cdot 346,7} \sum_{i=1}^{21-k} (p_i - 51,5)(p_{i+k} - 51,5). \quad (3.67)$$

Перші 5 значень вибіркової автокореляції приведені в табл. 3.6 і показані на рис. 3.13.

Таблиця 3.6 – Значення вибіркової автокореляції

k	0	1	2	3	4	5
ρ_k	1	0,164	0,082	-0,202	-0,399	-0,159

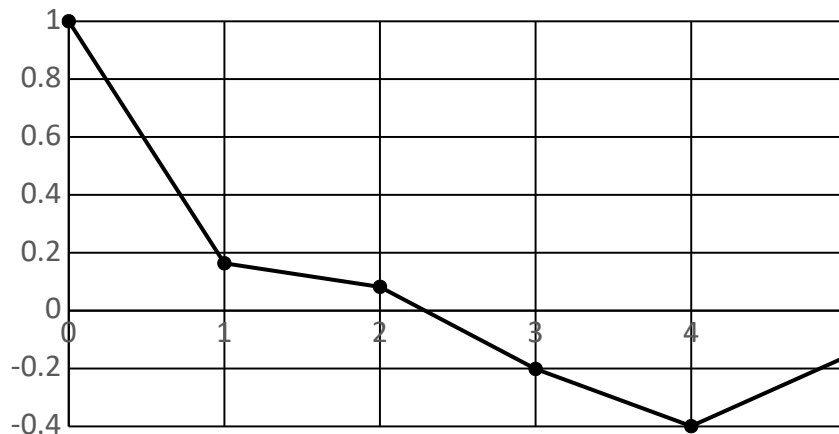


Рисунок 3.13 – Автокореляційна функція даних по споживанню електроенергії

Аналіз автокореляційної функції показує, що величини спожитої електроенергії практично не залежать одна від одної, тобто є «білим шумом». Внаслідок цього, математична модель стохастичного часового ряду приймає вигляд

$$p_i = 51.5 + a_i, \quad (i = 1, 2, \dots, 21), \quad (3.68)$$

де $\bar{a} = 0$, $\sigma_a^2 = 346,7$.

Аналогічно проводиться аналіз на стохастичність часового ряду видобутку ЗР. В табл. 3.5 представлені в останніх строках його середнє і дисперсія

$$\bar{v} = 137,8 \text{ тони}, \quad D[V] = 5369,8 \text{ тони}^2. \quad (3.69)$$

Для повної характеристики часового ряду треба встановити зв'язок між його членами, тобто обчислити автокореляційну функцію згідно формулі (3.43)

$$\rho_k = \frac{1}{(21-1) \cdot 5369,8} \sum_{i=1}^{21-k} (v_i - 137,1)(v_{i+k} - 137,1) \quad (3.70)$$

Перші 5 значень вибіркової автокореляції приведені в табл. 3.7 і показані на рис. 3.14.

Таблиця 3.7 – Значення вибіркової автокореляції

k	0	1	2	3	4	5
ρ_k	1	0,167	0,084	-0,046	-0,281	-0,356



Рисунок 3.14 – Автокореляційна функція даних по видобутку залізної руди шахти №1 (2 трансформатор)

Аналіз автокореляційної функції показує, що значення величини виробництва практично не залежать одна від одної, тобто є білим шумом. Внаслідок цього, математична модель стохастичного часового ряду приймає вигляд

$$v_i = 137,8 + a_i, \quad (i = 1, 2, \dots, 21), \quad (3.71)$$

де $\bar{a} = 0$, $\sigma_a^2 = 5369,8$.

Згідно даних, приведених в останній строчці табл. 3.8, за формулою (3.55) знаходимо

$$k_0 = \frac{695839}{620128,1} = 1,12 \quad (3.72)$$

Далі проводиться аналіз даних відповідно шахти №11 ДПП 3 (1 трансформатор). В табл. 3.8 представлені відповідні дані.

Коефіцієнт кореляції знаходимо по формулі (3.53), згідно даних в останній строчці табл. 3.8.

$$r = \sqrt{1 - \frac{\sum_{i=1}^{21} (v_i - 1,12 \cdot p_i)^2}{\sum_{i=1}^{21} v_i^2}} = \sqrt{1 - \frac{184097,3}{964888}} = 0,90. \quad (3.73)$$

Згідно шкалі Чеддока [163] величина коефіцієнта кореляції (3.73) вказує на дуже високий зв'язок між змінними, тобто математична модель

$$v_m = 1,12 \cdot p \quad (3.74)$$

є адекватною.

На рис. 3.14 і 3.15 представлено графіки даних табл. 3.8.

На рис. 3.15 чорним та червоним кольорами представлені графіки залежності виробництва і його моделі від часу. Аналіз приведених графіків підтверджує результати про адекватність математичної моделі, які здобуті аналітично.

Далі дослідимо на стохастичність часові ряди, утворені значеннями величин, що визначають процес (обсяги) електропостачання і обсяг виробництва.

Таблиця 3.8 – Аналітико-розрахункова таблиця математичної моделі щодо шахти №11 на ДПП 3 (1трансформатор)

№	p_i , КВт.-год	v_i , тони	p_i^2	$v_i \cdot p_i$	Модель $v_{m,i} = k_0 \cdot p_i$	v_i^2	$(v_i - v_{m,i})^2$
1	165.1	27258.0	297	49034.7	184.912	88209	12563.7
2	211.9	44901.6	0	0	237.328	0	56324.6
3	118.6	14066.0	0	0	132.832	0	17644.3
4	177.8	31612.8	140	24892	199.136	19600	3497.1
5	212.4	45113.8	210	44604	237.888	44100	777.7
6	284.6	80997.2	245	69727	318.752	60025	5439.4
7	121.3	14713.7	128	15526.4	135.856	16384	61.7
8	195.7	38298.5	122	23875.4	219.184	14884	9444.7
9	266.1	70809.2	455	121075.5	298.032	207025	24639.0
10	166.4	27689.0	332	55244.8	186.368	110224	21208.7
11	208.8	43597.4	332	69321.6	233.856	110224	9632.2
12	251.6	63302.6	260	65416	281.792	67600	474.9
13	148.5	22052.3	122	18117	166.32	14884	1964.3
14	221.3	48973.7	252	55767.6	247.856	63504	17.2
15	216.2	46742.4	385	83237	242.144	148225	20407.8
Середнє	197.7533	218.666 7					
Дисперсія	2395.168	17690.1					
Сума			620128.1	695839		964888	184097.3

Аналіз графіка залежності електроенергії від часу, який представлений на рис.3.9, вказує на його стохастичність. В табл. 3. 8 представлені в останніх строках його середнє і дисперсія

$$\bar{p} = 197,8 \text{ кВт} \cdot \text{год}, \quad D[p] = 2395,2 \text{ кВт} \cdot \text{год}^2. \quad (3.75)$$

Для повної характеристики часового ряду треба встановити зв'язок між його членами, тобто обчислити автокореляційну функцію згідно формули (3.43)

$$\rho_k = \frac{1}{(15-1) \cdot 2395,2} \sum_{i=1}^{15-k} (p_i - 197,8)(p_{i+k} - 197,8) . \quad (3.76)$$

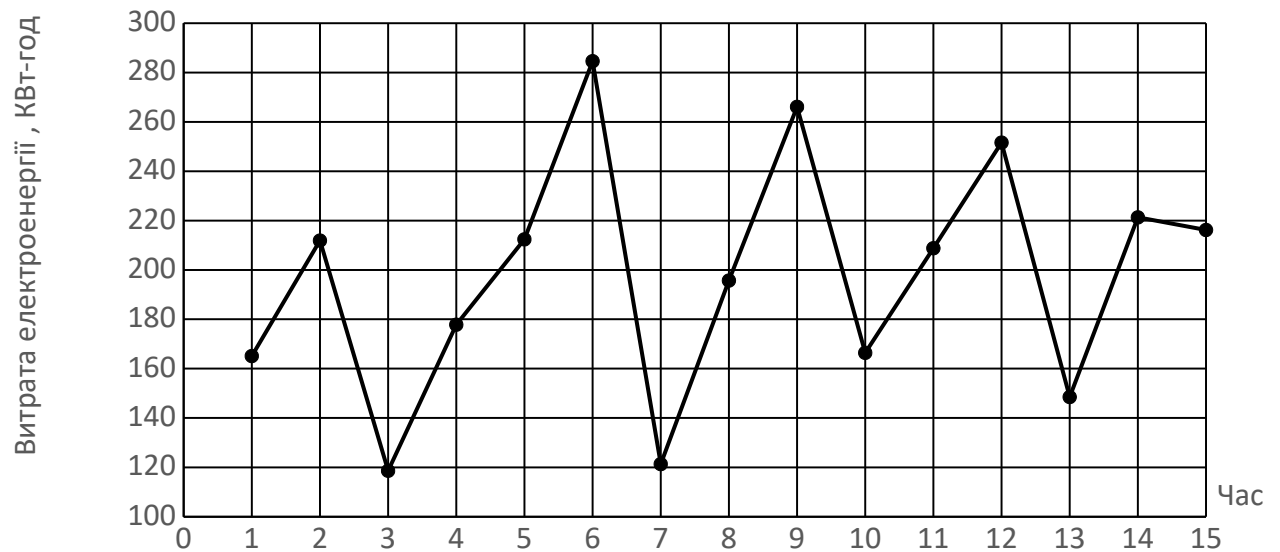


Рисунок 3.14 – Графік залежності величини спожитої електроенергії від часу шахти №11 (1 трансформатор)

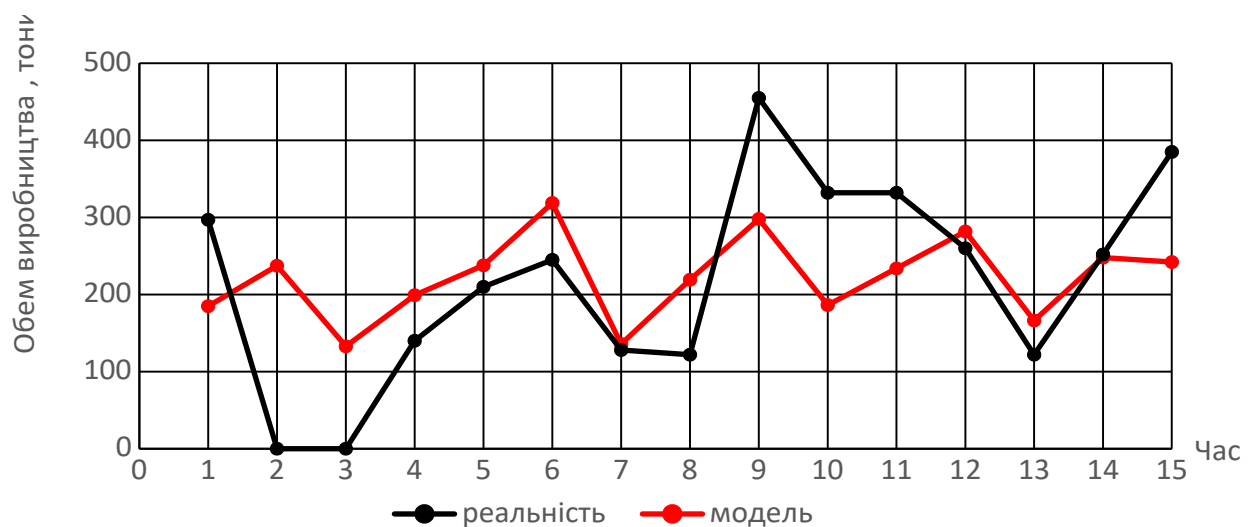


Рисунок 3.15 – Графік залежності обсягів видобутку залізної руди і його моделі від часу шахти №11 (1 трансформатор)

Перші 4 значення вибіркової автокореляції приведені в табл. 3.9 і показані на рис. 3.16.

Таблиця 3.9 – Значення вибіркової автокореляції

k	0	1	2	3	4
ρ_k	1	-0.48	-0.40	0.345	0.035

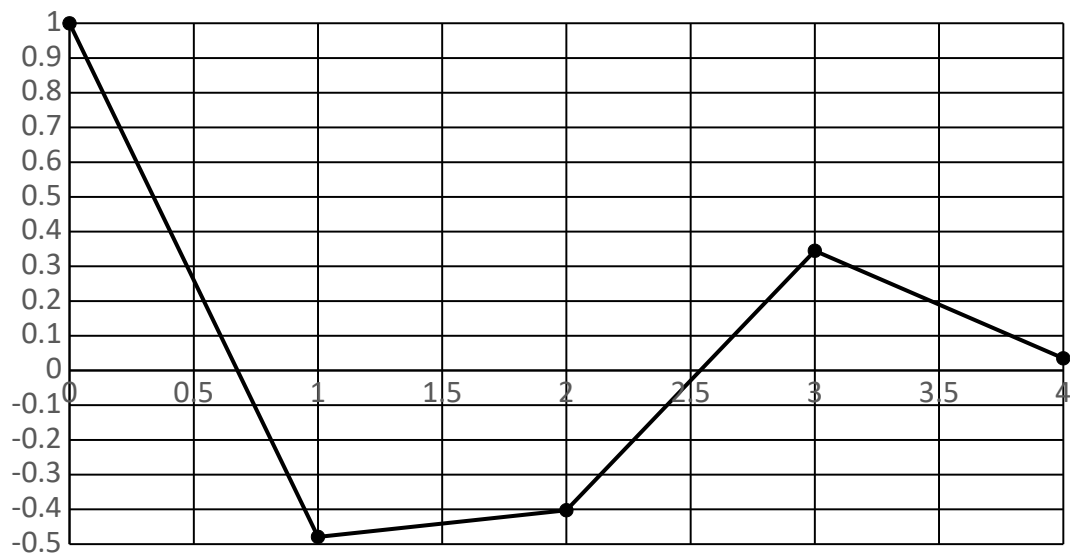


Рисунок 3.16 – Автокореляційна функція даних рівнів постачання електроенергії шахти №11 (1 трансформатор)

Аналіз автокореляційної функції характеризується знакозмінною кореляцією з тенденцією до згасання у міру зростання затримки. Таким чином, можна припустити, що має місце процес авторегресії першого порядку, який має вигляд

$$p_i = 197,8 - 0,48 \cdot (p_{i-1} - 197,8) + a_i. \quad (3.77)$$

Аналогічно проводиться аналіз на стохастичність часового ряду виробництва. В табл.3.8 представлені в останніх строках його середнє і дисперсія

$$\bar{v}=218,7 \text{ тони}, \quad D[V]=17690,1 \text{ тони}^2. \quad (3.78)$$

Для повної характеристики часового ряду треба встановити зв'язок між його членами, тобто обчислити автокореляційну функцію згідно формулі (3.43)

$$\rho_k = \frac{1}{(15-1) \cdot 17690,1} \sum_{i=1}^{15-k} (v_i - 218,7)(v_{i+k} - 218,7) . \quad (3.79)$$

Перші 4 значення вибіркової автокореляції приведені в табл. 3.10 і показані на рис. 3.17.

Таблиця 3.10 – Значення вибіркової автокореляції

k	0	1	2	3	4
ρ_k	1	0.12	-0.32	-0.037	0.12

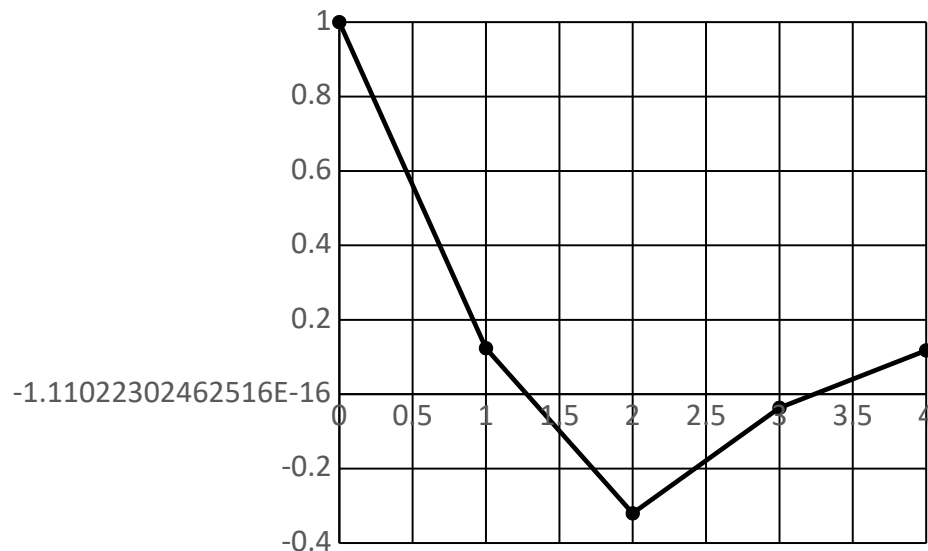


Рисунок 3.17 – Автокореляційна функція даних щодо виробництва шахти №11 (1 трансформатор)

Аналіз автокореляційної функції показує, що величини значень обсягів виробництва практично не залежать одна від одної, тобто є білим шумом.

Внаслідок цього, математична модель стохастичного часового ряду приймає вигляд

$$v_i = 218,7 + a_i \quad (i=1,2,\dots,15), \quad (3.79)$$

де $\bar{a}=0$, $\sigma_a^2=17690,1$

Далі проводиться аналіз даних щодо шахти №11 ДПП 3 (2 трансформатор).

В табл.3.11 представлені відповідні дані.

Таблиця 3.11 – Аналітико-розрахункова таблиця математичної моделі щодо шахти №11 на ДПП (2 трансформатор)

№	p_i , КВт.-год	v_i , тони	p_i^2	$v_i \cdot p_i$	Модель $v_{m,i} = k_0 \cdot p_i$	v_i^2	$(v_i - v_{m,i})^2$
1	105.7	140	11172.49	14798	305.473	19600	27381.31
2	65.5	245	4290.25	16047.5	189.295	60025	3103.047
3	50.1	0	2510.01	0	144.789	0	20963.85
4	115.7	472	13386.49	54610.4	334.373	222784	18941.19
5	89.4	350	7992.36	31290	258.366	122500	8396.79
6	0	560	0	0	0	313600	313600
7	174.1	490	30310.81	85309	503.149	240100	172.8962
8	136.7	350	18686.89	47845	395.063	122500	2030.674
9	145.2	385	21083.04	55902	419.628	148225	1199.098
10	147.6	315	21785.76	46494	426.564	99225	12446.53
11	158.7	402	25185.69	63797.4	458.643	161604	3208.429
12	179.8	368	32328.04	66166.4	519.622	135424	22989.23
13	134.9	525	18198.01	70822.5	389.861	275625	18262.55
14	212.2	542	45028.84	115012.4	613.258	293764	5077.703
15	183.7	858	33745.69	157614.6	530.893	736164	106999
Середнє	126.62	400.1333					
Дисперсія	3229.643	39252.84					
Сума			285704.4	825709.2		2951140	564772.3

Згідно даних, приведених в останній строчці табл. 3.11, за формулою (3.55) знаходимо

$$k_0 = \frac{825709,2}{285704,4} = 2,89 \quad (3.80)$$

Коефіцієнт кореляції знаходимо по формулі (3.53), згідно даних в останній строчці табл. 3.11.

$$r = \sqrt{1 - \frac{\sum_{i=1}^{15} (v_i - 2,89 \cdot p_i)^2}{\sum_{i=1}^{15} v_i^2}} = \sqrt{1 - \frac{564772,3}{2951140}} = 0,899 \quad (3.81)$$

Згідно шкалі Чеддока величина коефіцієнта кореляції (3.53) вказує на дуже високий зв'язок між змінними, тобто математична модель

$$v_m = 2,89 \cdot p \quad (3.82)$$

є адекватною.

На рис. 3.18 і 3.19 представлено графіки даних табл. 3.11.

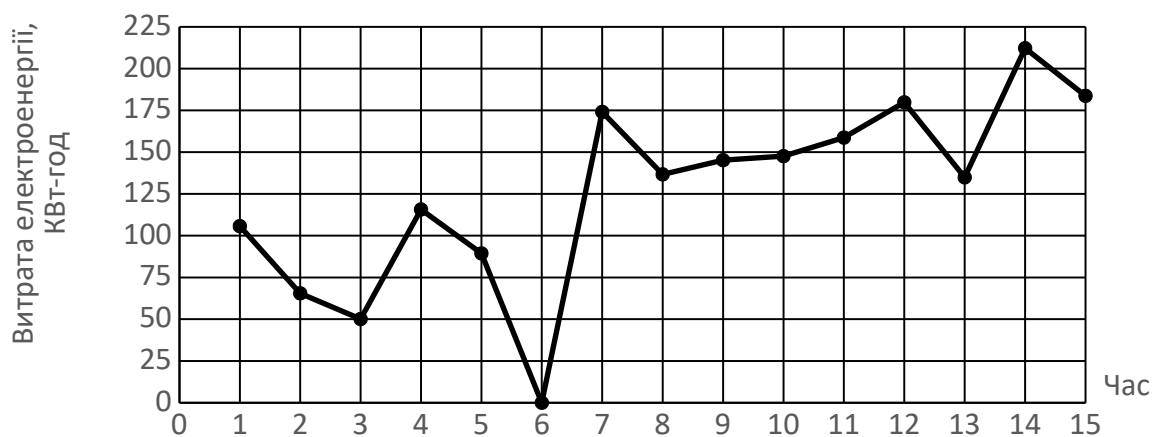


Рисунок 3.18 – Графік залежності величини рівнів постачання електроенергії від часу шахти №11 на ДПП (2 трансформатор)



Рисунок 3.19 – Графік залежності обсягів виробництва і його моделі від часу шахти №11 на ДПП (2 трансформатор)

На рис. 3.19 чорним та червоним кольорами представлені графіки залежності обсягів видобутку ЗР і його моделі від часу. Аналіз приведених графіків підтверджує результати про адекватність математичної моделі, які отримані аналітично.

Далі досліджуємо на стохастичність часові ряди, утворені значенням величин рівнів електропостачання і обсягом виробництва.

Аналіз графіка залежності електроенергії від часу, який представлений на рис. 3.18, вказує на стохастичність цього процесу. В табл. 3.11 представлені в останніх рядках його середнє і дисперсія

$$\bar{p} = 126,6 \text{ кВт} \cdot \text{год}, \quad D[P] = 3229,6 \text{ кВт} \cdot \text{год}^2 \quad (3.83)$$

Для повної характеристики часового ряду як необхідність є встановлення зв'язки між його членами, тобто обчислити автокореляційну функцію згідно формулі (3.43)

$$\rho_k = \frac{1}{(15-1) \cdot 3229,6} \sum_{i=1}^{15-k} (p_i - 126,6)(p_{i+k} - 126,6) . \quad (3.84)$$

Перші 4 значення вибіркової автокореляції приведені в табл. 3.12 і показані на рис. 3.20.

Таблиця 3.12 – Значення вибіркової автокореляції

k	0	1	2	3	4
-----	---	---	---	---	---

ρ_k	1	0.195	0.227	0.544	0.358
----------	---	-------	-------	-------	-------

Аналіз автокореляційної функції показує, що витрати електроенергії практично не залежать одна від одної, тобто є білим шумом. Внаслідок цього, математична модель стохастичного часового ряду приймає вигляд

$$p_i = 126.6 + a_i \quad (i=1,2,\dots,15), \quad (3.85)$$

де $\bar{a}=0$, $\sigma_a^2=3229,6$.

Аналогічно проводиться аналіз на стохастичність часового ряду виробництва. В табл. 3.11 представлені в останніх строках його середнє і дисперсія

$$\bar{v} = 400,1 \text{ тони}, \quad D[V] = 39252,8 \text{ тони}^2. \quad (3.86)$$

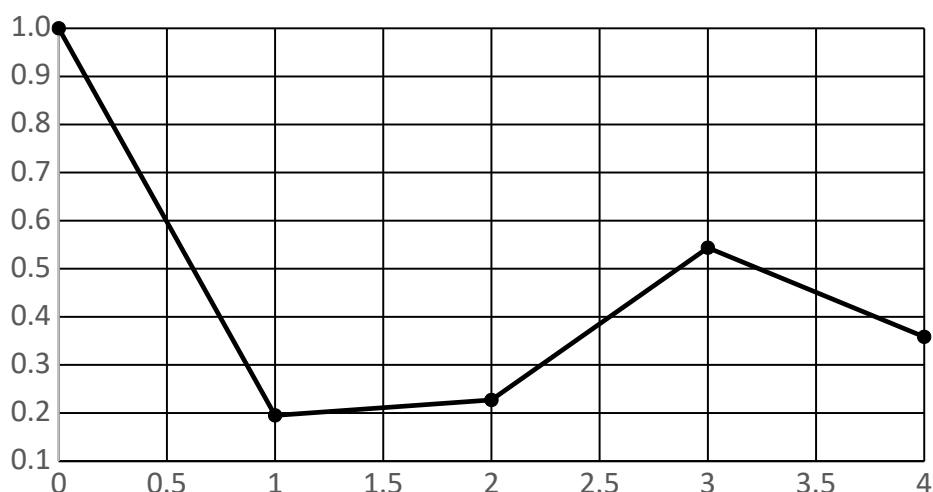


Рисунок 3.20 – Автокореляційна функція даних процесу постачання електроенергії шахти №11 на ДПП (2 трансформатор).

Для повної характеристики часового ряду треба встановити зв'язок між його членами, тобто обчислити автокореляційну функцію згідно формули (3.43)

$$\rho_k = \frac{1}{(15-1) \cdot 39252.8} \sum_{i=1}^{15-k} (v_i - 400.1)(v_{i+k} - 400.1). \quad (3.87)$$

Перші 4 значення вибіркової автокореляції приведені в табл. 3.13 і показані на рис. 3.21.

Таблиця 3.13 – Значення вибіркової автокореляції

k	0	1	2	3	4
ρ_k	1	0.458	0.336	-0.304	-0.244

Аналіз автокореляційної функції характеризується знакозмінною кореляцією з тенденцією до затухання у міру зростання затримки. Таким чином, можна припустити, що має місце процес авторегресії першого порядку, який має вигляд

$$v_i = 400,1 + 0,458 \cdot (v_{i-1} - 400,1) + a_i \quad (3.88)$$

де $\bar{a} = 0$.

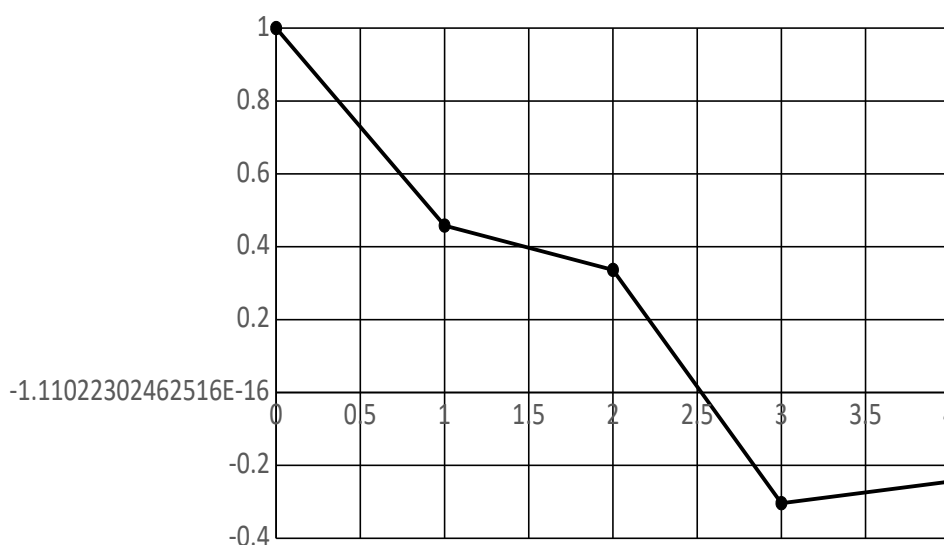


Рисунок 3.21 – Автокореляційна функція даних по виробництву ш. Центральна на УПП (2 трансформатор).

Далі проводимо розрахункові дослідження щодо конкретики шахти №9 ДПП 10 (трансформатор 1).

В табл. 3.14 представлені відповідні дані.

Згідно даних, приведених в останній строчці табл. 3.14, за формулою (3.55) знаходимо

$$k_0 = \frac{2187100}{806319} = 2,712 \quad (3.89)$$

Коефіцієнт кореляції знаходимо по формулі (3.53), згідно даних в останній строчці табл. 3.14,

$$r = \sqrt{1 - \frac{\sum_{i=1}^{12} (v_i - 2,712 \cdot p_i)^2}{\sum_{i=1}^{12} v_i^2}} = \sqrt{1 - \frac{1035600}{6968000}} = 0,923 . \quad (3.90)$$

Згідно шкалі Чеддока величина коефіцієнта кореляції вказує на високий зв'язок між змінними, тобто математична модель

$$v_m = 2.712 \cdot p \quad (3.91)$$

є адекватною.

На рис. 3.22 і 3.23 представлено графіки даних табл. 3.14.

Таблиця 3.14 – Розрахунково-аналітична таблиця шахти №9 ДПП 10 (трансформатор 1)

№	p_i , КВт.-год	v_i , тони	p_i^2	$v_i \cdot p_i$	Модель $v_{m,i} = k_0 \cdot p_i$	v_i^2	$(v_i - v_{m,i})^2$
1	179.7	592	32292.09	106382.4	487.3464	350464	10952.38
2	184.1	840	33892.81	154644	499.2792	705600	116090.7
3	152.4	704	23225.76	107289.6	413.3088	495616	84501.37
4	190.8	688	36404.64	131270.4	517.4496	473344	29087.44
5	216.2	896	46742.44	193715.2	586.3344	802816	95892.78
6	229.8	800	52808.04	183840	623.2176	640000	31252.02
7	290	888	84100	257520	786.48	788544	10306.31
8	526.2	704	276886.4	370444.8	1427.054	495616	522807.7
9	219.7	784	48268.09	172244.8	595.8264	614656	35409.3
10	200.7	768	40280.49	154137.6	544.2984	589824	50042.41
11	221.6	424	49106.56	93958.4	600.9792	179776	31321.64
12	286.9	912	82311.61	261652.8	778.0728	831744	17936.49
Середнє	241.5083	750					
Дисперсія	9673.061	19818.18					

Сума			806319	2187100		6968000	1035600
------	--	--	--------	---------	--	---------	---------

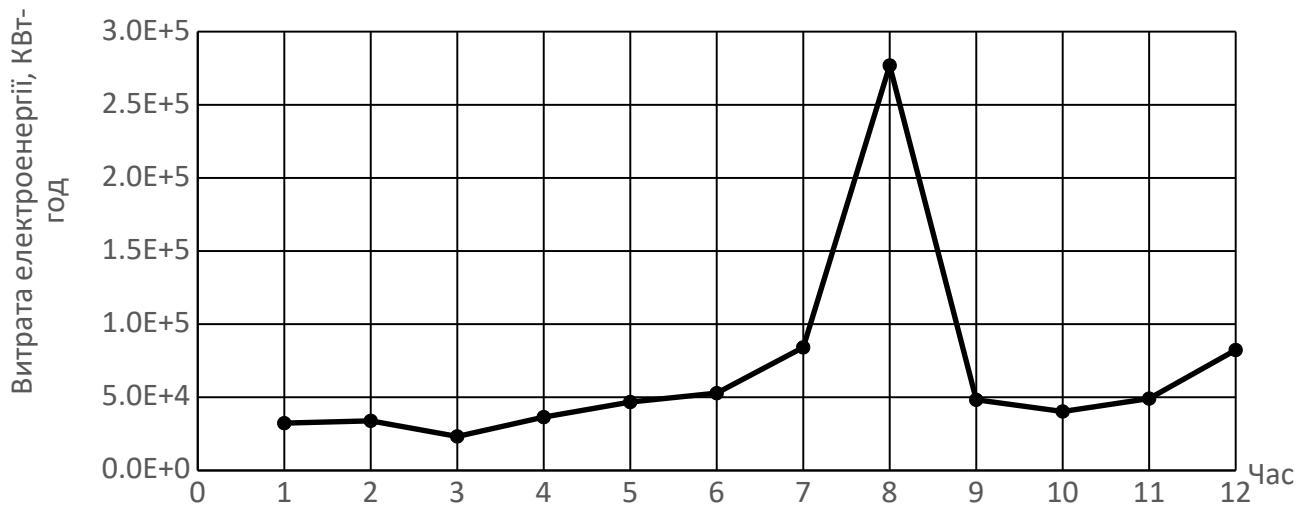


Рисунок 3.21 – Графік залежності величини постачання електроенергії від часу шахти №9 ДПП 10 (трансформатор 1)

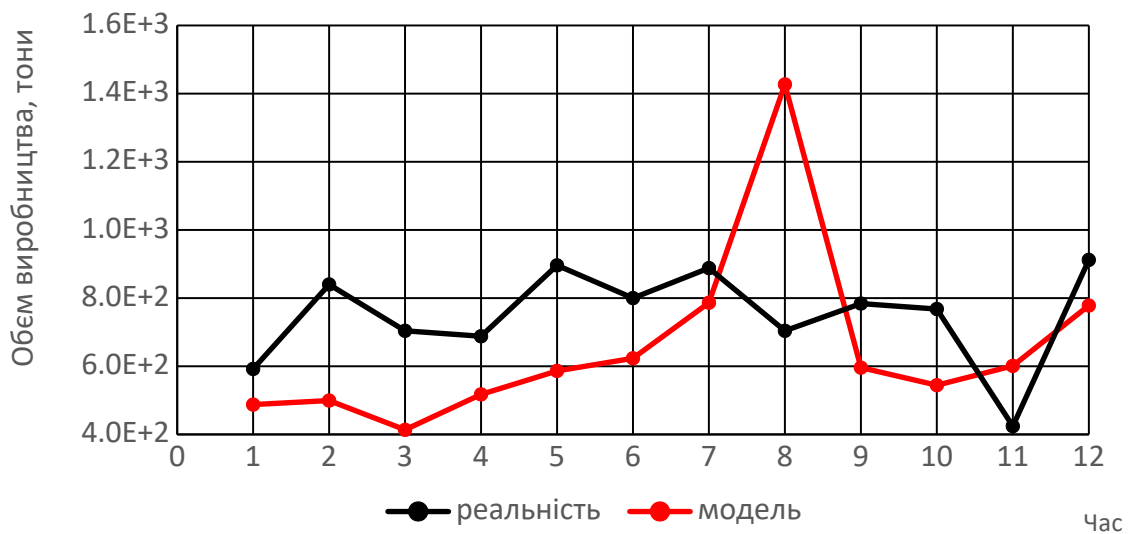


Рисунок 3.22 – Графік залежності виробництва і його моделі від часу шахти №9 ДПП 10 (трансформатор 1)

На рис. 3.22 чорним та червоним кольорами представлені графіки залежності обсягів видобутку ЗР від часу. Аналіз приведених графіків підтверджує результати про адекватність математичної моделі, які здобуті аналітично.

Далі досліджуємо на стохастичність часові ряди, утворені значенням величин електропостачання і обсягом виробництва.

Аналіз графіка залежності спожитої електроенергії від часу, який представлений на рис.3.21, вказує на його стохастичність. В табл.3.14 представлені в останніх строках його середнє і дисперсія

$$\bar{p} = 241,5 \text{ кВт} \cdot \text{год}, \quad D[P] = 9673,1 \text{ кВт} \cdot \text{год}^2 \quad (3.92)$$

Для повної характеристики часового ряду треба встановити зв'язок між його членами, тобто обчислити автокореляційну функцію згідно формулі (3.43)

$$\rho_k = \frac{1}{(12-1) \cdot 9673,1} \sum_{i=1}^{12-k} (p_i - 241,5)(p_{i+k} - 241,5) \quad (3.93)$$

Перші 4 значення вибіркової автокореляції приведені в табл. 3.15 і показані на рис. 3.23.

Таблиця 3.15 – Значення вибіркової автокореляції

k	0	1	2	3	4
ρ_k	1	-0.0071	-0.3176	-0.267	-0.106

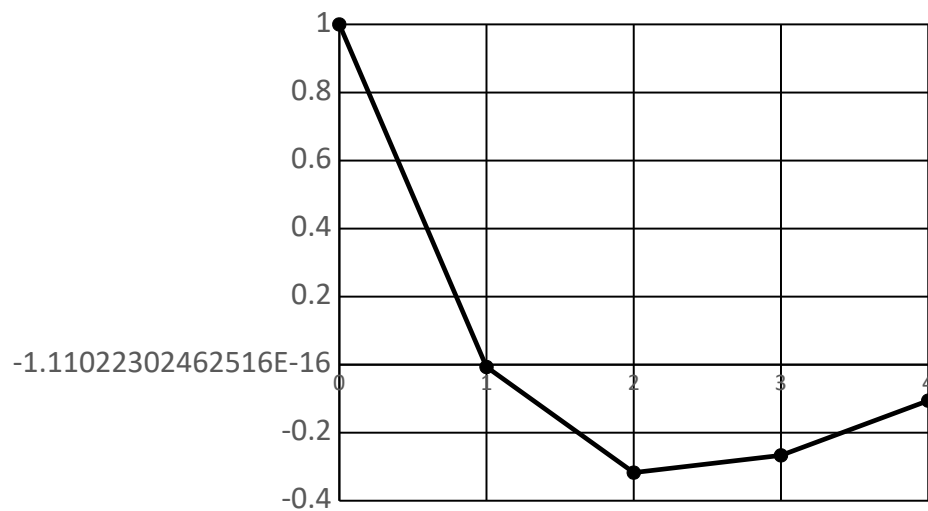


Рисунок 3.23 – Автокореляційна функція даних постачання електроенергії шахти №9 (трансформатор 1)

Аналіз автокореляційної функції показує, що витрати електроенергії практично не залежать одна від одної, тобто є білим шумом. Внаслідок цього, математична модель стохастичного часового ряду приймає вигляд

$$p_i = 241,5 + a_i, \quad (i = 1, 2, \dots, 12), \quad (3.94)$$

де $\bar{a} = 0$, $\sigma_a^2 = 9673,1$.

Аналогічно проводиться аналіз на стохастичність часового ряду значень величин обсягів виробництва. В табл.3.14 представлені в останніх строках його середнє і дисперсія

$$\bar{v} = 750 \text{ тони}, \quad D[V] = 19818,2 \text{ тони}^2. \quad (3.95)$$

Для повної характеристики часового ряду треба встановити зв'язок між його членами, тобто обчислити автокореляційну функцію згідно формулі (3.43)

$$\rho_k = \frac{1}{(12-1) \cdot 19818 / 2} \sum_{i=1}^{12-k} (v_i - 750)(v_{i+k} - 750). \quad (3.95)$$

Перші 4 значення вибіркової автокореляції приведені в табл. 3.16 і показані на рис. 3.24

Таблиця 3.16 – Значення вибіркової автокореляції

k	0	1	2	3	4
ρ_k	1	-0.361	-0.015	0.147	-0.592

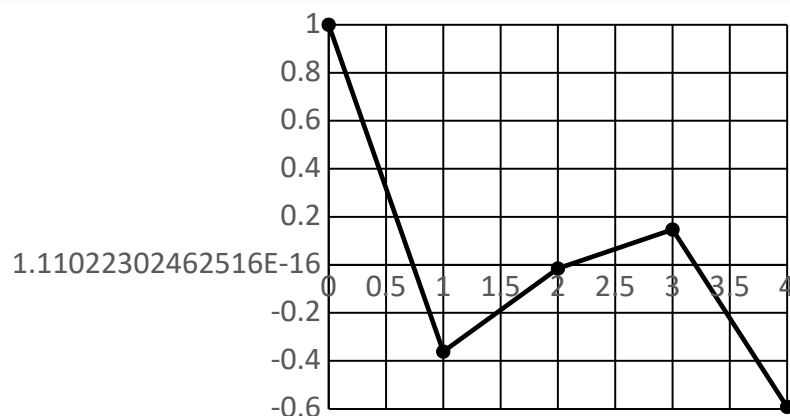


Рисунок 3.24 – Автокореляційна функція даних щодо обсягів виробництва шахти №9 (трансформатор 1)

Аналіз автокореляційної функції характеризується кореляцією з тенденцією до затухання у міру зростання затримки. Таким чином, можна припустити, що має місце процес авторегресії першого порядку, який має вигляд

$$v_i = 750 - 0,361 \cdot (v_{i-1} - 750) + a_i, \quad (3.96)$$

де $\bar{a} = 0$.

Таким чином, проведено дослідження щодо встановлення рівня зв'язку між рівнями постачання ЕЕ та відповідних обсягів видобутку ЗР на ряді шахт Кривбасу. Доведено їх стохастичність, побудовані відповідні моделі системи електропостачання – видобуток залізорудної сировини для шахти, як індивідуума.

3.3 Моделювання ефективності споживання електричної енергії приймачами напругою живлення до 1000 В дільничних підземних підстанцій

Як свідчать результати досліджень [93-157] в форматі аналізованої проблеми існує наявність багатьох альтернатив щодо підходів до підвищення електроенергоефективності підземних гірничих підприємств. Але у цих дослідженнях підхід обмежувався лише рівнем вибору структур систем електропостачання підземних гірничих підприємств. Тому, враховуючи нові тимчасові тенденції, у роботі було сформовано та розглянуто проблему необхідності управління енергопотоками гірничих підприємств. У той же час, з одного боку конкретних, а з іншого уніфікованих рішень варіантів у цих дослідженнях бракувало. Між тим, і як зазначалось в попередніх розділах даного дослідження, необхідність підвищення енергоефективності видобутку ЗРС пов'язано безпосередньо із погіршенням технологічних умов видобутку ЗР, зростанням глибини видобутку ЗРС, що є підґрунтям становлення проблеми на новий ступінь пошуку.

Таким чином, наразі існує нагальна необхідність розробки оцінки ефективності електроспоживання залізорудних підприємств із підземним способом видобутку ЗРС. У практичному плані це дозволить забезпечити визначення оптимуму щодо електроспоживання на залізорудних підприємствах із підземним способом видобутку ЗРС.

Вважається за доцільне організувати такий режим роботи видобутку залізорудної сировини, щоб вибрати заданий обсяг рудної маси. При цьому мінімізувати вартість споживання електроенергії, яка витрачається на забір заданого обсягу рудної маси. Постановка означеної задачі математично визначиться у вигляді [164].

Обмеження у вигляді необхідного обсягу споживання електроенергії для вибору заданого обсягу рудної маси

$$\int_0^T W(t) dt = Q_0, \quad (3.97)$$

де $W(t)$ – активна потужність, що споживається на ЦРС в момент часу t , кВт;

$[0, T]$ – проміжок часу роботи засобів забору рудної маси, година;

Q_0 – обсяг споживання електроенергії, що витрачається на вибір заданого обсягу рудної маси, кВт·год. Обсяг електроенергії витрачається на вибір заданого об'єму рудної маси.

При цьому повинні виконуватися обмеження величини активної потужності, що споживається на ЦРП,

$$0 \leq W(t) \leq W_{max}, \quad (3.98)$$

де W_{max} – максимальна величина активної потужності кВт. Вказана величина активної потужності споживається на ЦРП,

Постановка задачі щодо мінімізація вартості споживання електроенергії на забір заданого об'єму рудної маси, може бути сформульована як завдання мінімізації функціоналу по активній потужності, $W(t)$ за виділений проміжок часу $[0, T]$

$$Z = \int_0^T c(t) W(t) dt \rightarrow \min_w, \quad (3.99)$$

де $c(t)$ – вартість активної потужності (грн/кВт), що залежить від часу.

Таким чином, умови (2.97), (2.87) та (2.99) визначають математичну постановку задачі мінімізації вартості електроенергії за умови заданого обсягу видобутку залізорудної сировини.

Розглянемо рішення розглянутого завдання, обмежуючись умовою, що вартість активної потужності електроенергії в залежності від часу набуває лише двох значень, тобто є кусково-постійною функцією. Одна величина (менша) відноситься до нічного часу, друга величина (більша) відноситься до денного часу роботи щодо обладнання видобутку ЗР. На рис. 3.25 візуалізовано зображення дослідженої залежності вартості активної потужності від часу.

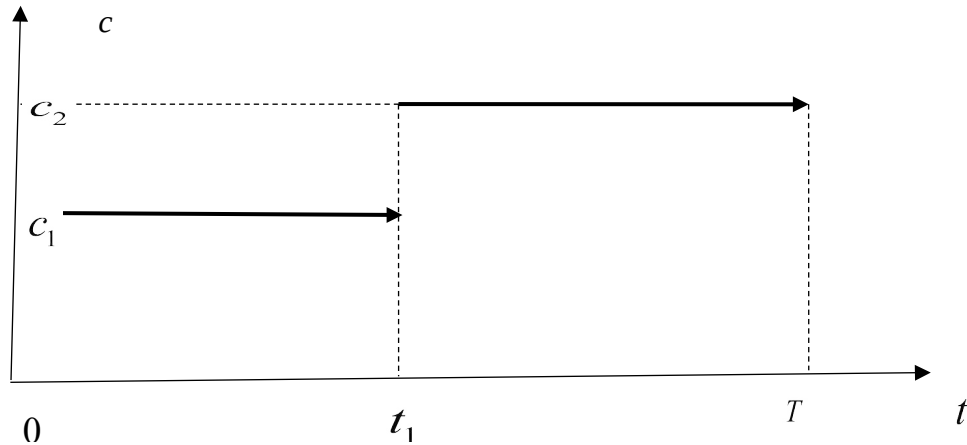


Рисунок 3.25 – Залежність вартості активної потужності від часу
 (c_1 – вартість активної потужності в нічний час, тобто на проміжку $[0, t_1]$, c_2 –
 вартість активної потужності в денний час, тобто на проміжку $[t_1, T]$)

Згідно з графіком, представленим на рис. 3.25, аналітично функція вартості активної потужності в залежності від часу доби може бути представлена формулою

$$c(t) = \begin{cases} c_1, & 0 \leq t < t_1 \\ c_2, & t_1 < t \leq T \end{cases} . \quad (3.100)$$

Для вирішення задачі (3.97), (3.98), (3.99) скористаємося видом функції (3.100). Користуючись лінійністю інтеграла, знаходимо

$$\int_0^T c(t) W(t) dt = c_1 \int_0^{t_1} W(t) dt + c_2 \int_{t_1}^T W(t) dt , \quad (3.101)$$

Введемо позначення

$$Q_1 = \int_0^{t_1} W(t) dt , \quad Q_2 = \int_{t_1}^T W(t) dt , \quad (3.102)$$

де Q_1 , Q_2 – розходи електроенергії на царинах часу, щодо вартості електроенергії c_1 і c_2 , відповідно.

Тоді функціонал (3.99) з урахуванням (3.102) запишеться так

$$Z = c_1 \cdot Q_1 + c_2 \cdot Q_2 . \quad (3.103)$$

У свою чергу, обмеження (3.96) можна записати у вигляді

$$\int_0^T W(t) dt = \int_0^{t_1} W(t) dt + \int_{t_1}^T W(t) dt ,$$

або, з урахуванням (3.97) та (3.103),

$$Q_1 + Q_2 = Q_0 . \quad (3.104)$$

Обмеження (3.98) на першому проміжку часу шляхом інтегрування представиться у вигляді

$$0 \leq \int_0^{t_1} W(t) dt \leq \int_0^{t_1} W_{\max} . \quad (3.105)$$

Відповідно до (3.102) нерівність (3.105) запишеться у вигляді

$$0 \leq Q_1 \leq \int_0^{t_1} W_{\max} . \quad (3.106)$$

Обчислюючи інтеграл у правій частині нерівності (3.106), остаточно знаходимо обмеження витрат електроенергії на ділянці часу, де вартість електроенергії c_1

$$0 \leq Q_1 \leq \overline{Q}_1, \quad (3.107)$$

де $\overline{Q}_1 = W 1_{max}$.

Обмеження (3.98) на другому проміжку часу $[t_1; T]$ шляхом інтегрування представиться у вигляді

$$0 \leq \int_{t_1}^T W(t) dt \leq \int_{t_1}^T W_{max} dt. \quad (3.108)$$

Відповідно до (3.102) нерівність (3.108) після інтегрування запишеться у вигляді

$$0 \leq Q_2 \leq \overline{Q}_2, \quad (3.109)$$

де $\overline{Q}_2 = W 1_{max}$.

Враховуючи отримані результати, завдання мінімізації енергоспоживання (3.97), (3.98), (3.99) з урахуванням (3.107) та (3.108) записується у вигляді

$$Z = c_1 Q_1 + c_2 Q_2 \rightarrow \min_{Q_1, Q_2}, \quad (3.110)$$

$$Q_1 + Q_2 = Q_0, \quad (3.111)$$

$$0 \leq Q_1 \leq \overline{Q}_1, \quad (3.112)$$

$$0 \leq Q_2 \leq \overline{Q}_2. \quad (3.113)$$

Аналіз задачі (3.110), ..., (3.113) показує, що це завдання відноситься до задач лінійного програмування. Таке завдання можна вирішити як геометрично, так і аналітично.

Перш, ніж вирішувати завдання (3.110), ..., (3.113), необхідно визначити умови, за яких рішення існує. Це стосується обмежень (3.111), (3.112) та (3.113). Завдання (3.110), ..., (3.113) визначається двома змінними Q_1 і Q_2 , тому її зручно вирішувати геометрично. Для цього скористаємося уявленням обмежень (3.111), (3.112) та (3.113) на площині в координатах $Q_1 O Q_2$.

Внутрішній прямокутник на рис. 3.26 визначає область обмежень (3.132) та (3.133). У свою чергу, відрізок прямої, що проходить через точки $(0; Q_0)$ і $($

$Q_0; 0$), визначає обмеження (3.113). Аналіз розташування обмежень на рис.3.26 показує, що в даному випадку задача (3.110),..., (3.113) не має рішення, тому що відрізок прямої, який відповідає обмеженню (3.111), не перетинає прямокутну область, що утворюється за допомогою обмежень (3.132) та (3.113).

Умову існування рішення поставленої задачі можна визначити, як наявність ненульової відстані між кутовою точкою $M(\bar{Q}_1; \bar{Q}_2)$ і прямою, що проходить через точки $(Q_0; 0)$ і $(0; Q_0)$, тобто рівнянням, що задається у вигляді

$$(l): Q_2 + Q_1 = Q_0. \quad (3.114)$$

Аналітично цю умову, користуючись методами аналітичної геометрії [165], можна записати як відхилення точки $M(\bar{Q}_1; \bar{Q}_2)$ від прямої l .

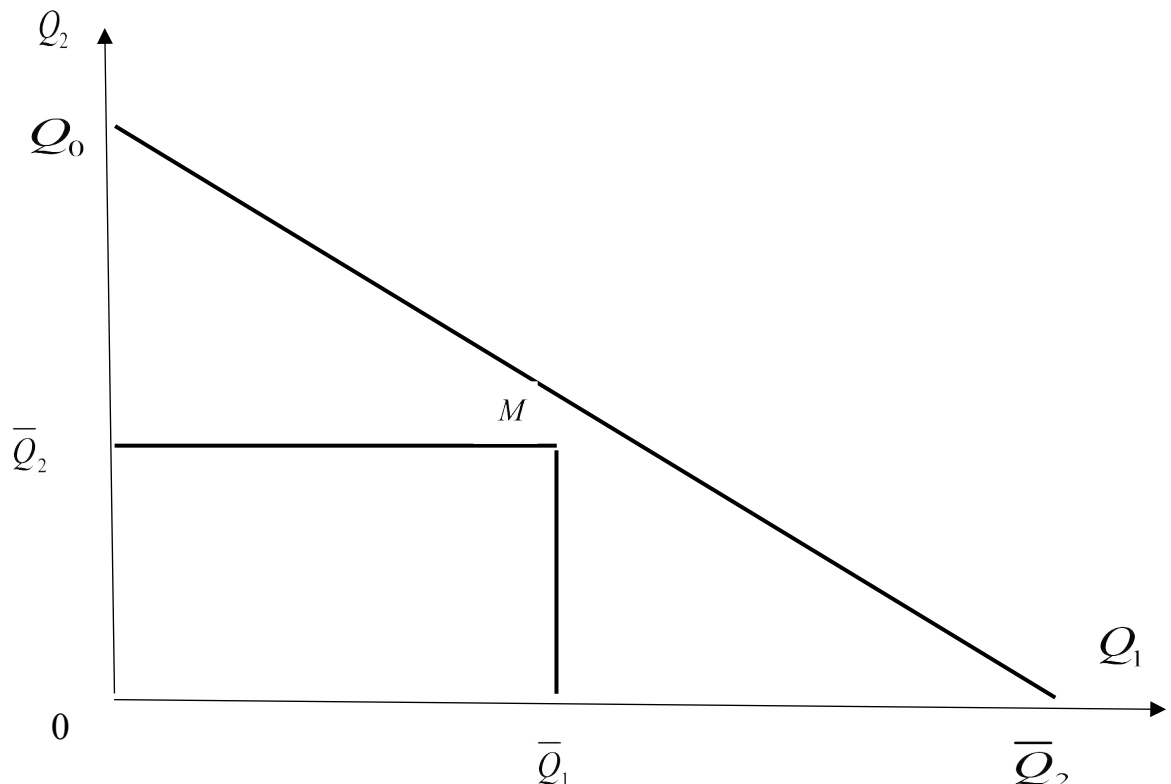


Рисунок 3.26 – Графічне подання обмежень (3.111), (3.112) та (3.113) при відсутності рішення

$$\rho(M; l) = \frac{\bar{Q}_2 + \bar{Q}_1 - Q_0}{\sqrt{2}} < 0,$$

або, коротше,

$$\bar{Q}_2 + \bar{Q}_1 - Q_0 < 0. \quad (3.115)$$

Враховуючи (3.107) і (2.109), нерівність (3.115) можна записати у вигляді

$$W \leq 11_{0maxmax},$$

або, після алгебраїчних перетворень,

$$W \leq \frac{Q_0}{T_{max}}. \quad (3.116)$$

Таким чином, умова (3.116) визначає умову розв'язання задачі (3.110), ..., (3.113).

Розглянемо геометричне рішення задачі (3.110), ..., (3.113) за умови існування рішення, тобто виконання умови

$$W \leq \frac{Q_0}{T_{max}}, \quad (3.117)$$

На рис. 3.27 представлено графічне уявлення ситуації за існування рішення. Більш товстими лініями виділено область можливого існування рішення. Разом з тим, враховуючи обмеження (3.111) у вигляді рівності, можна стверджувати, що рішення має перебувати на відрізку $[M_1 M_2]$. Для знаходження конкретного значення скористаємося умовою (3.110). Напрямок найбільш швидкого зростання функціоналу Z визначається його градієнтом, який записується у вигляді

$$\text{grad } Z = \left(\frac{\partial Z}{\partial Q_1}; \frac{\partial Z}{\partial Q_2} \right). \quad (3.118)$$

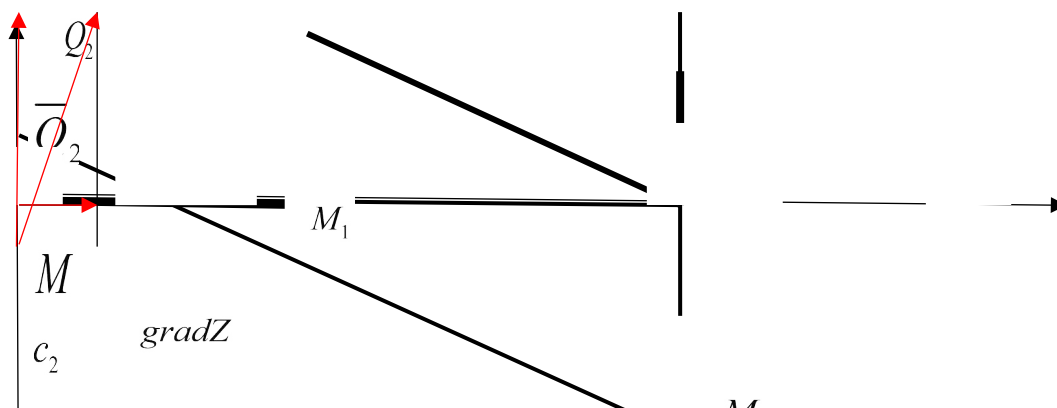


Рисунок 3.27 – Графічне подання обмежень (3.111), (3.112) та (3.113) за наявності рішення

Враховуючи конкретний вид функціоналу Z , знаходимо згідно (3.117)

$$\text{grad } Z = (c_1, c_2). \quad (3.119)$$

На рис. 3.27 показано відповідно (3.119) напрям градієнта Z за умови, що $c_1 < c_2$ (це відповідає співвідношенню вартості електроенергії в нічний і денний час). Рухаючись у напрямку, протилежному напрямку градієнта Z , знаходимо найменшу величину функціоналу Z . Ця величина буде досягнута у точці

$$M_2 (\bar{Q}_1; Q_0 - \bar{Q}_1).$$

При цьому мінімальна величина цільового функціоналу становитиме

$$(3.120)$$

Розглянемо аналітичне рішення за умови, що рішення існує, тобто виконується умова (3.120). Відповідно для вирішення необхідно здійснити перехід до однієї змінної, користуючись умовою (3.111),

$$Q_2 = Q_0 - Q_1. \quad (3.121)$$

В наслідок відповідного перетворення цільова (2.110) запишеться у вигляді

$$Z = c_1 Q_1 + c_2 (Q_0 - Q_1) \rightarrow \min_{Q_1},$$

або після перетворення

$$Z = c_2 \cdot Q_0 - (c_2 - c_1) \cdot Q_1 \rightarrow \min_{Q_1} \quad (3.122)$$

Таким чином, умова (3.113) набуде вигляду

$$0 \leq Q_0 - Q_1 \leq \overline{Q_2},$$

або, після алгебраїчних перетворень

$$Q_0 - \overline{Q_2} \leq Q_1 \leq Q_0. \quad (3.123)$$

З урахуванням (3.122) та (3.123) постановка завдання щодо мінімізації рівнів енергоспоживання набуде вигляду

$$Z = c_2 Q_0 - (c_2 - c_1) \cdot Q_1 \rightarrow \min_{Q_1}, \quad (3.124)$$

$$0 \leq Q_1 \leq \overline{Q_1}, \quad (3.125)$$

$$Q_0 - \overline{Q_2} \leq Q_1 \leq Q_0. \quad (3.126)$$

Так як функціонал цілі Z лінійно залежить від змінної Q_1 і $c_2 > c_1$, то мінімальне значення досягається на правій межі змінної Q_1 , тобто оптимальна величина

$$\hat{Q}_1 = \overline{Q_1}. \quad (3.127)$$

При цьому, згідно (3.120),

$$\hat{Q}_2 = Q_0 - \overline{Q_1}. \quad (3.128)$$

Отриманий результат збігається з раніше знайденим геометричним шляхом. Необхідно підкреслити, що в результаті розв'язання задачі (3.110), (3.111), (3.112) знайдено оптимальні рівні споживання ЕЕ за задані проміжки часу, що визначаються її диференційованою вартістю, тобто

$$\int_0^{t_1} W(t) dt = \hat{Q}_1, \quad (3.129)$$

$$\int_0^{t_1} W(t) dt = \hat{Q}_2. \quad (3.130)$$

Згідно (3.130) знаходимо середнє значення активної потужності на проміжку часу $[0; t_1]$, де вартість електроенергії c_1 ,

$$\overline{W}_1 = \frac{\hat{Q}_1}{t_1}. \quad (3.131)$$

Враховуючи (3.126), формулу (3.131) запишемо у вигляді

$$\bar{W}_1 = \frac{\int_0^{t_1} W(t) dt}{t_1} = \frac{W_{1_{max}}}{t_1},$$

тобто

$$\bar{W}_1 = W_{max}. \quad (3.132)$$

В свою чергу, згідно (3.130), знаходимо середнє значення активної потужності на проміжку часу $[t_1; T]$, де вартість електроенергії c_2 ,

$$\bar{W}_2 = \frac{\hat{Q}_2}{T - t_1}.$$

Враховуючи (3.127), можна записати

$$\bar{W}_2 = \frac{Q_0 - \bar{Q}_1}{T - t_1} = \frac{Q_0 - W_{1_{max}}}{T - t_1}. \quad (3.133)$$

Враховуючи (3.132), мінімальне величина функціонала (3.124) послідовно приймає вигляд

$$\begin{aligned} Z_{\min} &= c_2 Q_0 - (c_2 - c_1) \cdot \hat{Q}_1, \\ Z_{\min} &= c_2 Q_0 - (c_2 - c_1) \cdot \bar{Q}_1, \\ Z_{\min} &= c_2 Q_0 - (c_2 - c_1) \cdot W_{max} \cdot t_1. \end{aligned} \quad (3.134)$$

Подальші дослідження вимагають залучення статистичних даних з електроспоживання на окремих підприємствах із підземним способом видобутку ЗРС для підтвердження одержаних результатів.

В якості прикладу, для більшої візуалізації, приведімо дослідження споживання ЕЕ рядом підземних залізрудних підприємств Криворізького залізрудного регіону.

З січня 2019 року, згідно відповідного закону електрогенеруючі компанії України (обленерго), прагнучи до ідеального добового вирівнювання обсягів «виробництво-споживання» ЕЕ, активно стимулюють споживачів. Цінова політика генеруючих підприємств відносно споживачів ЕЕ відповідає часовим проміжкам, які утворюють зонні добові погодинні тарифи за споживання електроенергії.

Найбільша ціна за спожиту ЕЕ спостерігається в денні години доби. Таким чином, постає проблема щодо розв'язання двоєдиної задачі. Відповідна задача стосується розподілу споживання ЕЕ в годинах доби з одночасним забезпеченням неперервності технології виробничих процесів. Відповідне вирішення задачі стосується загалом підприємств національної економіки, і залізничних зокрема.

На рис. 3.28 представлено реальний добовий графік споживання ЕЕ на аналізованому підземному гірничорудному підприємстві.

Обчислюємо інтегральні характеристики реального споживання електроенергії, згідно графіка рис. 3.28. Витрати електроенергії протягом доби становлять величину

$$Q_0 = \int_0^{24} W(t)dt = 24000 \quad \text{кВт} \cdot \text{год.} \quad (3.135)$$

Згідно (3.117) визначимо умову існування розв'язання задачі (3.110),..., (3.113)

$$W_{\max} \geq \frac{Q_0}{T} = \frac{24000}{24} = 1000 \quad \text{кВт.} \quad (3.136)$$

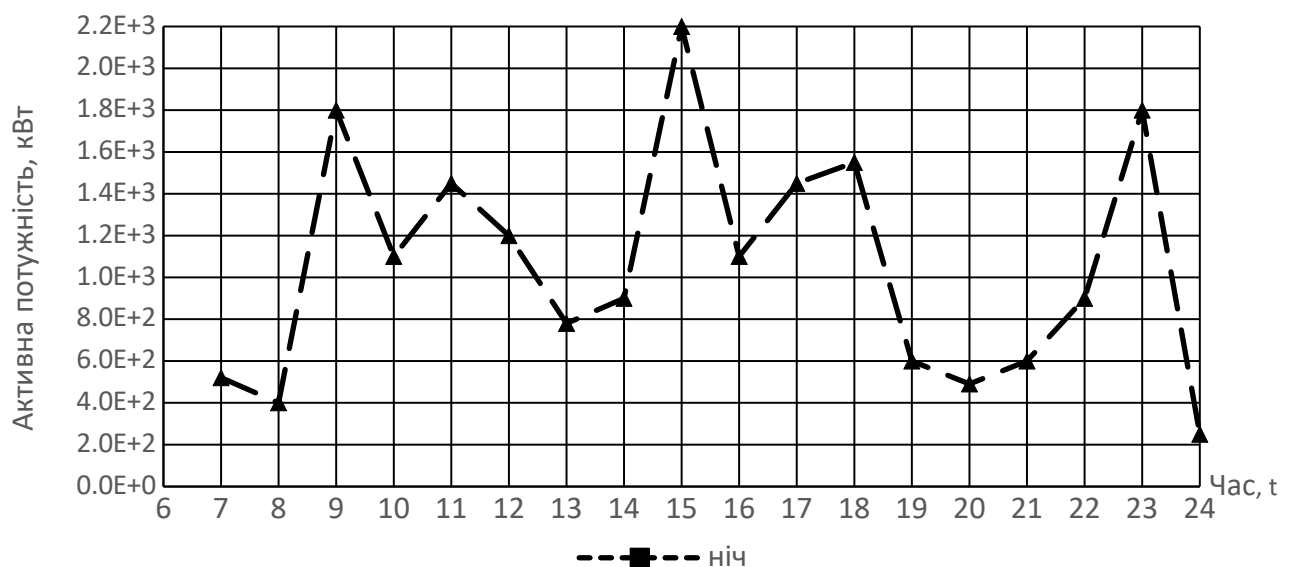


Рисунок 3.28 – Добовий графік споживання електроенергії підземним залізничним підприємством

Згідно рис. 3.28, можна прийняти, що

$$W_{max} = 2200 \text{ кВт.} \quad (3.137)$$

Подаді обрахуємо витрати на споживання ЕЕ, відповідно до функціоналу (3.103). Наперед визначимо, відповідно (6), споживання електроенергії для зонних тарифів «ніч» і «день»:

$$Q_n = \int_1^7 W(t) dt = 5160 \text{ кВт} \cdot \text{год}, \quad (3.138)$$

$$Q_d = \int_7^{24} W(t) dt = 18840 \text{ кВт} \cdot \text{год}. \quad (3.139)$$

Підставляємо здобуті результати (3.138) і (3.139) в формулу (3.103) і, користуючись даними табл. 3.17, знаходимо загальні витрати на електроспоживання за добу в гривнях,

$$Z = c_n \cdot Q_n + c_d \cdot Q_d = 0,96 \cdot 5160 + 2,20 \cdot 18840 = 4953,6 + 41448 = 46401,6 \text{ грн.} \quad (3.140)$$

Згідно (3.134), визначимо мінімальне значення загальних затрат на електроспоживання за добу в грн.

$$Z_{min} = 0,96 \cdot 15400 + 2,2 \cdot 8600 = 33704 \text{ грн.} \quad (3.141)$$

Застосування алгоритму мінімізації рівнів електроспоживання залізорудних підприємств, який представлений формулами (3.110)–(3.117), показало, що в зазначених видах підприємств існує відповідний резерв по оптимізації рівнів електроспоживання, який базується на ефективному врахуванні тарифів. Це можна підтвердити шляхом порівняння реальних затрат з оптимальними затратами по електроспоживанню для прикладу, який був розглянутий вище. З огляду на (3.138) і (3.139), знаходимо величину відносного зменшення рівнів споживання ЕЕ підприємства протягом доби

$$\frac{Z - Z_{min}}{Z} \cdot 100\% \approx 27,4\% \quad (3.142)$$

Таким чином, рівень електроспоживання конкретної залізорудної шахти протягом доби може бути зменшено на 27,4 %.

Відзнакою пропонованого методу щодо розв'язування задачі, є те, що. використання залежності ціни електроенергії від часу задається у вигляді

кусково-постійної функції. Тому ціна електроенергії задається кусково-постійної функцією з двома значеннями.

В порівнянні з існуючою практикою оцінювання рівнів ЕЕ створено підґрунтя для забезпечення можливості застосування аналітичних методів для аналізу вартісно-цільових характеристик рівнів електроспоживання на гірничодобувних підприємствах з перспективою алгоритму керування та розробки цілісної управлінської структури - АСК. Обмеження при цьому визначаються величиною необхідної електричної потужності, що обумовлено енергетичними та технологічними характеристиками досліджуваного об'єкта.

3.4 Висновки до розділу 3

1. Математичне моделювання процесу споживання електроенергії в умовах підземних споживачів з рівнем напруги 0,4 кВ залізорудних шахт в форматі стохастичного процесу дозволило визначити його більш глибокі характеристики, котрі пов'язані з випадковістю його протікання. Тривіально визначені параметри потужності електроспоживання, які будувались тільки на середніх величинах, доповнилися новими системоутворюючими параметрами, які характеризують їх розкид. Більш того, при такій окремій особливості потужності електроспоживання, яка визначається нормальним законом розподілу, можлива повна характеристика цього процесу, а також обсягів енергоспоживання за визначений час як випадкових процесів.

2. Встановлено, що в сучасних умовах видобутку ЗР підземним способом, пов'язаним з подальшим поглибленням ведення гірничих робіт в залізорудних шахтах, необхідний ретельніший аналіз процесів споживання електроенергії різними споживачами, зокрема, рудозабірних пристроїв. Це стало основою для побудови цільової функції, що враховує коливання рівнів електроспоживання рудозабірними пристроями ЗРС залежно від часу доби; розроблена методика дослідження електроспоживання як стохастичного

процесу дозволяє поширити її на інші допоміжні роботи, які виконуються при розробці та видобутку залізних руд.

3. Виходячи з реальних умов функціонування підземних залізрудних підприємств, побудовано математичну модель, що дозволяє досліджувати залежність добових рівнів електроспоживання у функції варіативності добових тарифів за спожиту електроенергію. Особливістю запропонованої математичної моделі є те, що залежність ціни електроенергії задається як кусково-постійна функція. Отримані теоретичні результати при порівнянні їх з реальними даними, дозволило дійти висновку про існування реального резерву при оптимізації рівнів електроспоживання, який є похідним при ефективному використанні існуючих тарифів. Це підтверджується шляхом порівняння реальних затрат з оптимальними при оцінювання процесу електроспоживання, і для викладеного прикладу складає біля 27,4 %.

РОЗДІЛ 4

РОЗРОБКА СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ РІВНЯМИ СПОЖИВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ ПРИЙМАЧАМИ З НАПРУГОЮ ЖИВЛЕННЯ ДО 1000 В ЗАЛІЗОРУДНИХ ШАХТ

4.1 Обґрунтування та вибір методу керування енергоспоживанням підземних приймачів електричної енергії напругою живлення до 1000 В

Як викладено в розділі 1 даного наукового пошуку, підземні споживачі електричної енергії залізрудних шахт напругою до 1000 В живляться в більшості своїй від ДПП. Окрім цього, як викладено в тому ж таки розділі 1 та Додатку Д, превентивно ефективним заходом для підвищення рівня енергоефективності даних електричних систем в межах нормованих значень напруги живлення споживачів до 1000 В доцільним слід вбачати напругу 0,6 кВ замість існуючого варіанту 0,4 кВ. Саме для таких варіантів існуючих рівнів напруги – 0,4 кВ як експлуатуємої і 0,6 кВ як перспективної і проведемо дослідження зі створення та структурування автоматизованої системи керування споживанням приймачів до 1000 В залізрудних шахт.

Вихідні позиції для реалізації такого проєкту та досягнення тим самим кінцевої мети досліджень дозволяють це зробити як завершення даного наукового пошуку [149, 150].

Як свідчать оглядові дослідження автора для вирішення задач автоматизованого керування споживанням ЕЕ протягом доби залучають, як правило, оптимізаційний метод змішаного цілочисельного лінійного програмування (ЗЦЛП) [149, 150, 166]. Даний підхід має високу швидкість отримання рішення та, достатню для даного формату пошуку, точність. Але, дані переваги здебільшого розповсюджуються на випадки, коли немає обмежень або вони не достатньо строгі. Також застосування цього методу не дуже підходить для керування в оперативному режимі, який потрібен для реалізації в промисловій енергосистемі концепту smart grids [173]. Приведених недоліків позбавлений генетичний алгоритм, що відноситься до класу

еволюційних [171]. У ході рішення задач оптимізації цей метод використовує механізми ідентичні до біологічної еволюції. Він добре підходить для рішення задач ЗЦЛП [167].

Для більшого підтвердження правильності нашого превентивного вибору методу створимо евристичну систему керування (ЕСК) споживанням ЕЕ приймачами залізорудної шахти з напругою живлення до 1000 В та проаналізуємо її якість. За об'єкт приймемо декілька блоків підземного горизонту. Перелік споживачів напругою живлення до 1000 В та його технічні дані для розрахунків наведені у табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Перелік приймачів горизонту залізорудної шахти з напругою живлення до 1000 В

№ з/п	Споживач	Встановлена потужність	Кількість	Сумарна потужність
	Блок 1			
1	Скреперна лебідка 30ЛС-2С	30	4	120
2	Скреперна лебідка 55ЛС-2С	55	2	110
3	Скреперна лебідка 17ЛС-2С	18.5	4	74
4	Скреперна лебідка 30ЛС-2С	30	2	60
5	Вентилятор СВМ-6М	14	2	28
6	Буровий станок НКР-100М	4	6	24
7	Вібролюк АШЛ	15	4	60
8	Зварювальний трансформатор СТН-500	33	1	33
9	Освітлення	10	1	10
	Блок 2			
10	Скреперна лебідка 30ЛС-2С	30	4	120
11	Скреперна лебідка 55ЛС-2С	55	2	110
12	Скреперна лебідка 17ЛС-2С	18.5	2	37
13	Скреперна лебідка 30ЛС-2С	30	1	30
14	Вентилятор СВМ-6М	14	1	14

15	Буровий станок НКР-100М	4	2	8
16	Вібролюк АШЛ	15	3	45
17	Зварювальний трансформатор СТН-500	33	1	33
18	Інші	7.5	1	7.5
	Блок 3			
19	Скреперна лебідка 30ЛС-2С	30	2	60
20	Скреперна лебідка 55ЛС-2С	55	1	55
21	Скреперна лебідка 30ЛС-2С	30	3	90
22	Вентилятор СВМ-6М	14	1	14
23	Буровий станок НКР-100М	4	2	8
24	Вібролюк АШЛ	15	2	30
25	Зварювальний трансформатор СТН-500	33	1	33
26	Інші	5	1	5
	Блок 4			
27	Скреперна лебідка 30ЛС-2С	30	2	60
28	Скреперна лебідка 55ЛС-2С	55	1	55
29	Скреперна лебідка 17ЛС-2С	18.5	2	37
30	Шкребковий конвеєр КС-2	60	2	120
31	Віброустановка ВЛ-2 (ПВШ)	10	9	90
32	Буровий станок НКР-100М	4	2	8
33	Вентилятор СВМ-5М	5.5	5	27.5
34	Вентилятор СВМ-6М	14	2	28
35	Освітлення	18	1	18

Аналіз переліку приймачів (табл. 4.1) з напругою живлення до 1000 В вказує на те, що їх можна розділити на дві категорії: до перших відносяться ті, котрі створюють умови для безпечної праці співробітників шахти (стабільний графік роботи), як-от вентилятори місцевого провітрювання і освітлення, а до других – усі інші (плаваючий графік роботи).

На рис. 4.1 показана схема частини електроенергосистеми шахти з ЕСК споживанням ЕЕ приймачами залізорудних шахт з напругою живлення до 1000 В.

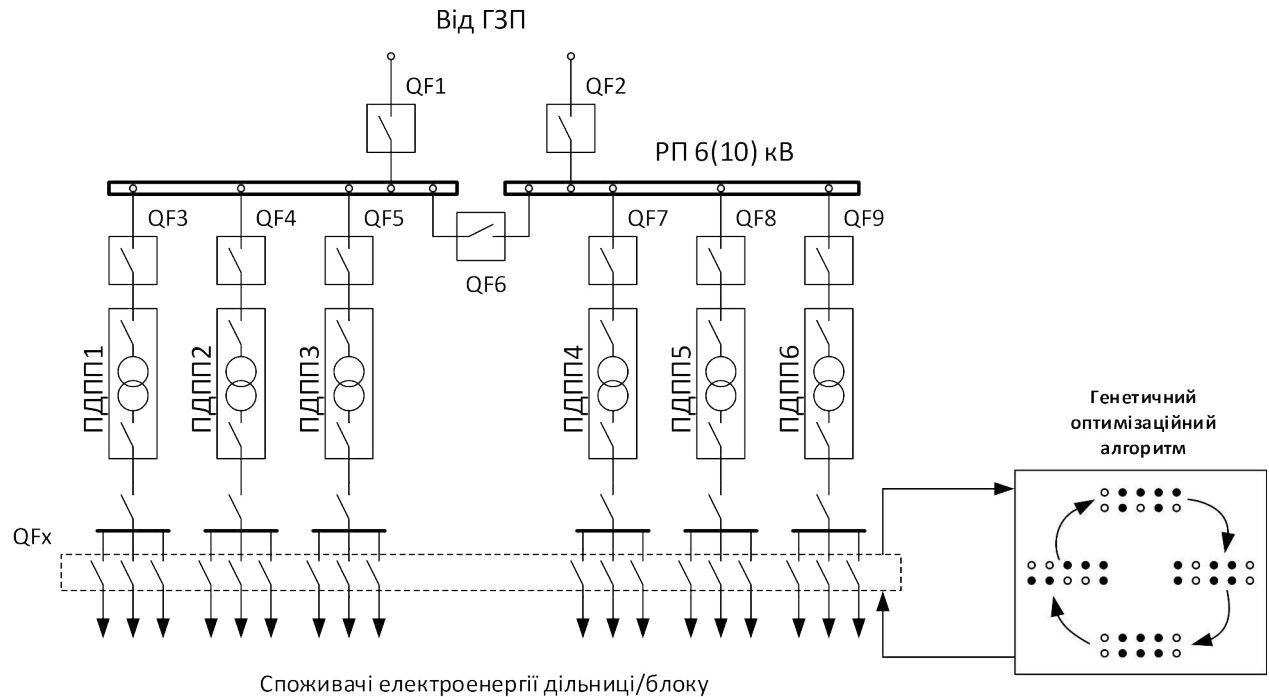


Рисунок 4.1 – Евристична система автоматизованого керування споживанням електричної енергії підземними електроприймачами дільничних підземних підстанції з напругою живлення до 1000 В

Вона містить дві складові. З одного боку це устаткування системи електропостачання та підземних приймачів ЕЕ виробок горизонту, а з іншого – блок оптимізації графіка споживання ЕЕ та керування комутацією приймачів до електроенергосистеми. Сама СЕП складається поверхневого РП 6(10) кВ до якого через реактори підключаються секції ЦПП. Від ЦПП живляться приймачі приствольного двору та РПП. До РПП приєднуються ДПП і потім приймачі блоків видобутку руди [145]. Основну частину підземного сегменту електроенергосистеми РП – ЦПП – РПП – ДПП для спрощення об'єднуємо, що доцільно і можливо у віртуальну шахтну підстанцію – генеруючу систему з зосередженими параметрами [169].

Далі вже розглядається безпосереднє підключення до цієї віртуальної підстанції підземних приймачів ЕЕ очисних і підготовчих виробок залізорудних шахт з напругою живлення до 1000 В через вимикачі QFх і QFу. ЕСК комує ці вимикачі управляючи електроспоживанням.

4.2 Математичне описання задачі керування енергоспоживанням підземних приймачів електричної енергії напругою живлення до 1000 В

Згідно з логікою прийнятого варіанту досліджень встановимо оптимізаційну задачу керування енергоспоживанням на прикладі реальних даних горизонту конкретної залізорудної шахти. Як змінну величину для кожного приймача з напругою живлення до 1000 беремо бінарну величину, що визначає стан підключення до системи електропостачання, що прийматиме одне з двох значень: 1 – приймач споживає ЕЕ від шахтної електроенергосистеми, 0 – приймач відключений. У такому варіанті залучення ГА виправдане через двійкове кодування фенотипу.

Функція мінімізації якої треба здійснити має таку форму.

$$\arg \min_{x_{ij} \in \mathbb{Z}_2} J(x_{ij}) = \sum_{i=1}^{N_T} C_i \sum_{j=1}^{N_L} P_{ij} \cdot x_{ij}, \quad (4.1)$$

де N_L – число приймачів горизонту з напругою живлення до 1000 В;

N_T – кількість годин;

i – номер години;

j – номер приймача напругою до 1000 В;

x_{ij} – стану комутації j -го підземного приймача до шахтної електроенергосистеми в i -у годину;

C_i – ціна ЕЕ в i -у годину, грн/кВт·год;

P_{ij} – потужність приймача, кВт.

Згідно формули (4.1) ГА повинен встановити графік споживання ЕЕ приймачами віртуальної шахтної підстанції, що дає мінімум витрат на придбання ЕЕ у електропостачальної компанії.

Як-от часовий період в дослідженні розглядатимемо добу з годинними проміжками, так як згідно Закону України «Про ринок електричної енергії» сегмент ринку ЕЕ є внутрішньодобовим погодинним, що корелює з тим, що для залізорудної шахти раціональним терміном планування видобутку руди є також доба.

На роботу ЕСК енергоспоживанням підземних приймачів ЕЕ залізорудних шахт з напругою живлення до 1000 В накладаються обмеження:

1. Добове споживання ЕЕ не має бути більшим за обсяги, замовлені напередодні у електропостачальної компанії:

$$\sum_{i=1}^{N_T} \sum_{j=1}^{N_L} P_{ij} \cdot x_{ij} \leq P_{PDH}, \quad (4.2)$$

2. Потужність одночасно підключених до шахтної електроенергосистеми приймачів напругою до 1000 В не повинна перевищувати загальну потужність ДПП:

$$\sum_{j=1}^{N_L} P_{ij} \cdot x_{ij} \leq P_{ном ДПП} \quad \text{при } i = const \quad (4.3)$$

де P_{ij} – потужність j -приймача в i -у годину.

3. Кожен приймач ЕЕ напругою до 1000 В, що забезпечує видобуток ЗР, працює фіксований час:

$$\sum_{i=1}^{N_T} x_{ij} = n_j, \quad (4.4)$$

де n_j – час роботи j -го споживача протягом доби, годин.

Час роботи того чи іншого приймача, як всіх разом, дозволяє у ході керування врахувати планові обсяги видобутку ЗР, як відношення цих обсягів на продуктивність j -ого приймача. n_j приймає тільки цілочисельне значення.

Отже, формули (4.1)–(4.4) показують, що в ЕСК споживанням ЕЕ підземних приймачів очисних і підготовчих виробок горизонту шахти входами є стан підключення приймача до електроенергосистеми та погодинний тариф на ЕЕ, виходом – витрати на ЕЕ.

4.3 Оцінювання якості роботи евристичної системи керування енергоспоживанням підземних приймачів електричної енергії напругою до 1000 В з визначенням раціональних налаштувань генетичного алгоритму

Проведемо оцінювання якості пошуку мінімуму (4.1) з задіянням ГА при обмеженнях (4.2) – (4.4). Застосуємо пакет MATLAB/Global Optimization Toolbox/ga. Проаналізуємо вплив налаштувань ГА на його якість. Варіюванню підлягатимуть: число фенотипів у популяції, число елітних фенотипів та схрещування фенотипів. У [171] доведено, що саме ці характеристики найбільш впливають на пошук мінімуму.

У ході дослідження популяції становили 100 і 200 фенотипів, при елітних фенотипах 0, 5, 10, 20 та залучали одноточкове, двоточкове схрещування [171] та схрещування Лапласа [166]:

$$\begin{cases} x = p_1 + b_l \cdot |p_1 - p_2|; \\ x = p_2 + b_l \cdot |p_1 - p_2|, \end{cases} \quad (4.5)$$

де b_l – випадкове число отримане з розподілу Лапласа.

Схрещування Лапласа вважається найбільш підходящим для рішення задачі ЗЦЛП [166].

Середнє значення потужності завжди 377,958 кВт, так як регулювання енергоспоживанням підземних приймачів ЕЕ напругою до 1000 В не провадиться, а залучається тільки розподіл їх роботи у часі.

Вартість ЕЕ розглядалася як нормальнорозподілена випадкова змінна. Згідно матеріалів [168] пікова вартість ЕЕ на 06.03.2023 становила 3949,48 грн/МВт·год і ця ціна трималася більшу частину доби з 07.00 до 24.00. Електропостачальна компанія за основу бере саме це значення та додає до нього свою націнку. Тому математичне очікування встановив $M[X] = 5000$ грн/МВт·год. Також слідуючи тенденціям, можна стверджувати, що пікове значення буде збільшуватися до цієї вартості, так як, наприклад, за рік до цього 05.03.2022 пікова ціна була 2646,25 грн/МВт·год, тобто за означений період зростання склало 49,25%. Це, звісно, пояснюється станом у якому опинилася ОЕСУ. Ситуація стабілізувалася, тому можна спрогнозувати, що зростання буде відбуватися, але меншими темпами. У розподілі вартості будуть власні пікові значення, котрі будуть імітувати, або форс-мажорні обставини роботи електроенергосистеми, або свідоме підвищення тарифів на ЕЕ.

Показники роботи ЕСК керування споживанням ЕЕ підземними приймачами залізорудної шахти напругою до 1000 В наведені у табл. 4.2 та на рис. 4.2 – рис. 4.25.

Таблиця 4.2 – Показники роботи евристичної системи керування споживанням ЕЕ підземними приймачами напругою до 1000 В

Розмір популяції, од.	Число елітних фенотипів в популяції, од.	Схрещування	Витрати на електро-енергію, грн/добу	Кількість поколінь до завершення еволюції	σ , кВт	$P_{\max}$, кВт	$P_{\min}$, кВт
100	10	Одноточкова	42516,6	114	104,12	708,5	217,5
100	10	Двоточкова	42590,23	138	92,8202	592,5	173
100	10	Лапласа	41454,99	181	111,3152	654,5	199
100	5	Одноточкова	42337,16	131	114,7072	661,5	229
100	5	Двоточкова	42681,84	108	96,6943	560	218

Мінімальне значення критерію (4.1) становило 42516,6 грн/доба. Графік зміни значення мінімуму (4.1) на поколінні (рис. 4.3) вказує на те, що еволюція починається зі значення 43303,3 грн/доба. Також з рис. 4.3 вочевидь, що еволюція завершується на 114 поколінні, коли зміни в значенні (4.1) майже немає. ЕСК скорочує витрати на ЕЕ для шахти на 1,817 %. При чому після 24 покоління, ГА скорочує витрати на ЕЕ тільки на 0,195 %. ГА проходить оптимізацію за 164 покоління.

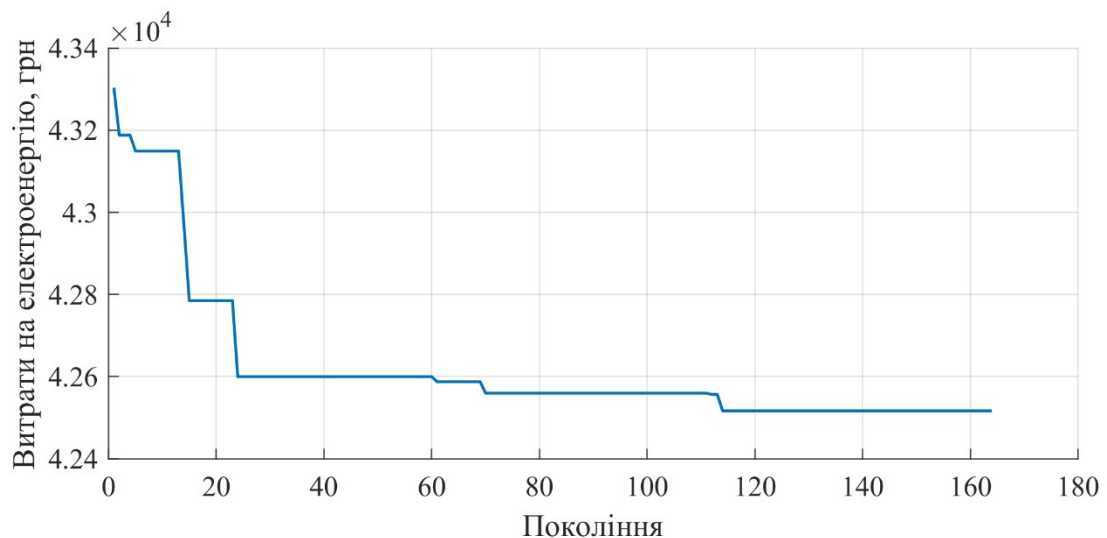


Рисунок 4.3 – Зміна мінімуму формули (4.1) під час залучення генетичного алгоритму з одноточковим схрещуванням, популяцією 100 фенотипів і 10 елітних фенотипах

Діаграми (рис. 4.4) показують, як змінювалася якість популяцій через кожні 40 поколінь ГА.

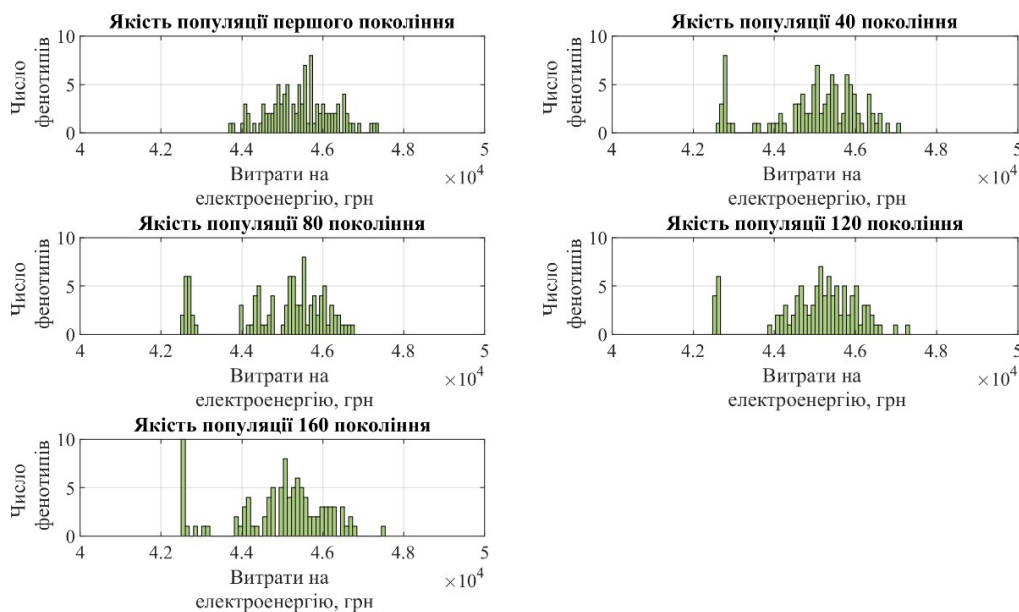


Рисунок 4.4 – Популяції при зміні поколінь під час оптимізації графіку роботи підземних приймачів напругою до 1000 В при залученні генетичного алгоритму з одноточковим схрещуванням, розмірі популяції 100 фенотипів і 10 елітних фенотипах у популяції

У першій популяції один фенотип дає значення формули (4.1) між 43680 грн/доба і 43754 грн/доба. І тут це є найкращий результат. Найбільша кількість фенотипів у першому поколінні, а саме 8 одиниць, дають значення формули (4.1) між 45678 грн/доба і 45752 грн/доба. Після 40 покоління популяція розділяється: 86 фенотипів дає значення між 43470 грн/доба і 47110 грн/доба, а 14 фенотипів – між 42560 і 43015 грн/доба. Схоже розділення тримається до останніх поколінь.

По графіку споживання ЕЕ (рис. 4.5) вочевидь, що пікове споживання потужності 708,5 кВт після формування остаточного графіку роботи приходить на 5 годину ранку, а мінімальне – 217,5 кВт на 24 годину ночі. Максимальний і мінімальний тариф діє о 16 і 12 годинах, відповідно, а потужність підключених до електроенергосистеми приймачів напругою до 1000В в цей час складає 310,5 кВт і 460 кВт.

Рисунок 4.6 – Графік роботи підземних приймачів з напругою живлення до 1000 В при задіянні генетичного алгоритму з двоточковим схрещуванням, популяції 100 фенотипів і 10 елітних фенотипах

Згідно рис. 4.7 при такому ГА в 1-й популяції найкращий фенотип дає значення формули (4.1) 43535,8 грн/доба, а в момент закінчення оптимізації досягає 42590,2 грн/доба, тобто витрати менші на 2,172%, що ліпше чим при одноточковому схрещуванні. Але пошук займає 138 поколінь (114 при одноточковому схрещуванні), тобто триваліший на 21,053%. При чому вихід з ГА стається на 188 поколінні. І кінцевий результат виявляється гіршим ніж при одноточковому схрещуванні 42590,2 грн/доба проти 42516,6 грн/доба. Витрати на ЕЕ вищі на 0,1731%, що разом з тривалістю говорить про те, що не можна рекомендувати такий ГА до застосування.

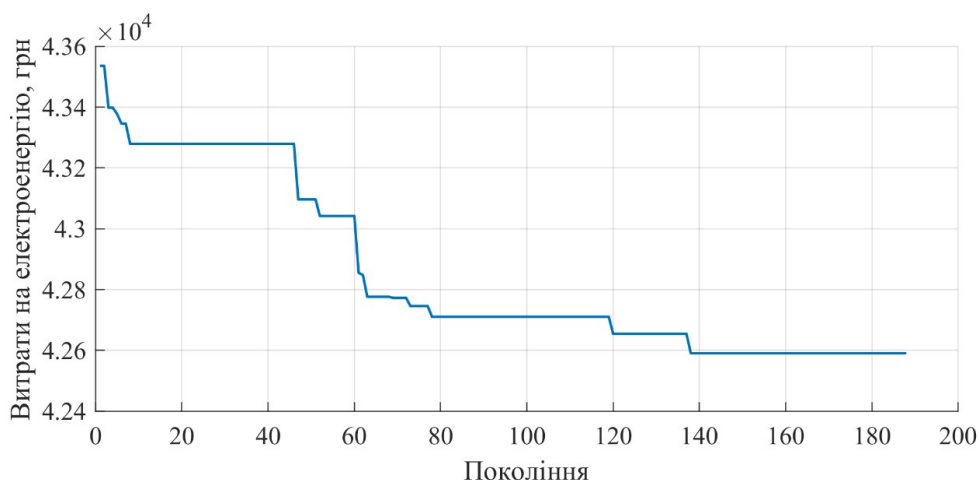


Рисунок 4.7 – Зміна мінімуму формули (4.1) під час залучення генетичного алгоритму з двоточковим схрещуванням, популяцією 100 фенотипів і 10 елітних фенотипах

Діаграми (рис. 4.8) свідчать про ті ж закономірності, що і при одноточковому схрещуванні.

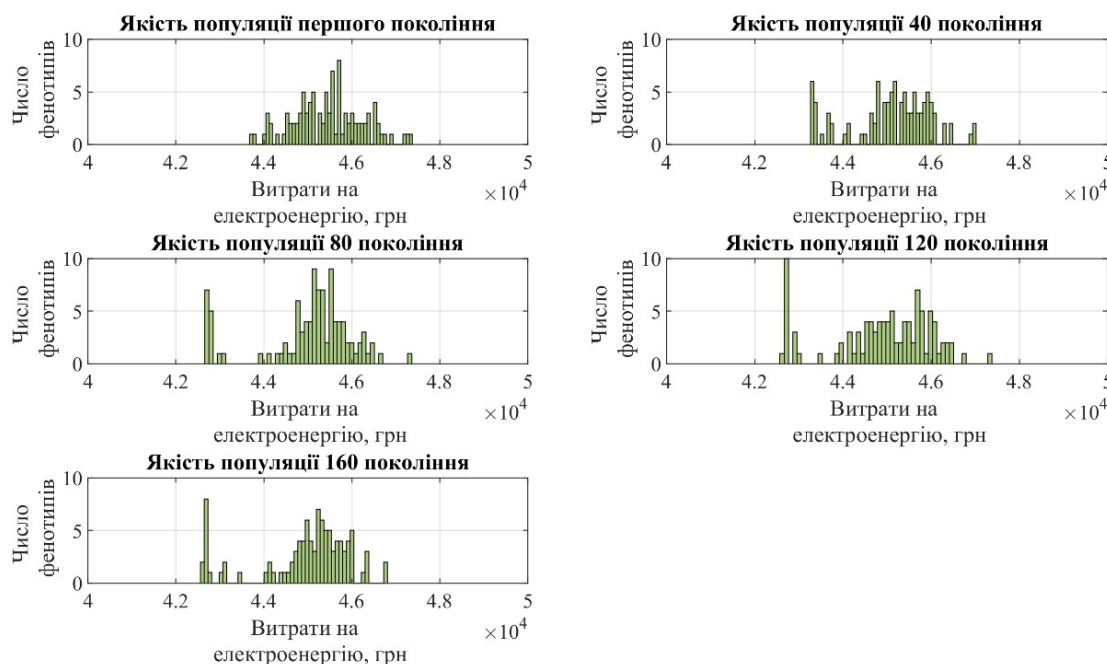


Рисунок 4.8 – Популяції при зміні поколінь під час оптимізації графіку роботи підземних приймачів напругою до 1000 В при залученні генетичного алгоритму з двоточковим схрещуванням, популяції 100 фенотипів і 10 елітних фенотипах у популяції

У 1-й популяції фенотипи за містяться між 43680 грн/доба і 47380 грн/доба. Тут найбільша кількість фенотипів – 8, має значення між 45678 грн/доба і 45752 грн/доба. Після 80 покоління популяція поділяється: основна (86 фенотипів на 80 поколінні та 85 – на 160 поколінні) і якісніша (14 фенотипів на 80 поколінні і 15 – на 160). При чому в 120 поколінні 10 фенотипів давало значення функції (4.1) в межах 42666 грн/доба і 42762 грн/доба, а у 1600 поколінні – 8 давало значення від 42645 грн/доба по 42730 грн/доба. Найбільша кількість фенотипів – 8, приймає значення між 45678 грн/доба і 45752 грн/доба.

Графік споживання ЕЕ (рис. 4.9) вказує на те, що пікове споживання потужності 592,5 кВт приходить на 21 годину, а мінімальне 173 кВт – на 16 годину. Співставляючи з ГА з одноточковим схрещуванням, при двоточковому пікове та мінімальне споживання потужності менші на 16,373% і 25,723%.

Рис. 4.11 свідчить про те, що при схрещуванні за Лапласом найякісніший фенотип у 1-ій популяції дає витрати 43682,4 грн/доба.

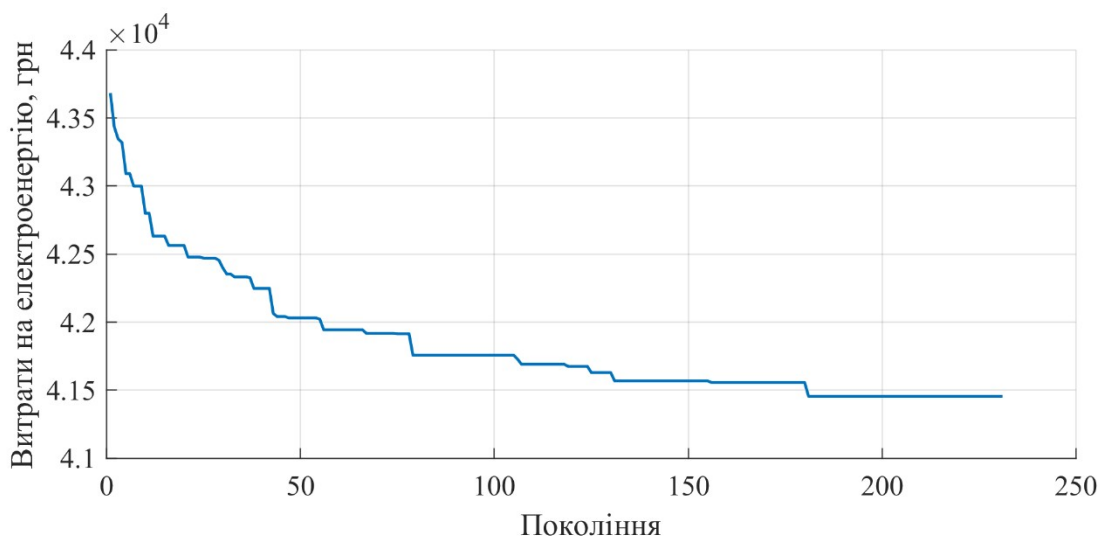


Рисунок 4.11 – Зміна мінімуму формули (4.1) під час залучення генетичного алгоритму зі схрещуванням Лапласа, популяції 100 фенотипів і 10 елітних фенотипах

Роботою ГА досягаються витрати у 41454,99 грн/доба, тобто скорочуються на 5,099%. Тут маємо найнижчі значення формули (4.1) з усіх трьох схрещувань, як-от на 2,497% нижчий ніж при одноточковому і на 2,665% ніж при двоточковому. Але сама оптимізація найдовша – налічує 181 покоління до мінімізації витрат і 231 покоління до виходу з ГА. Це на 67 поколінь (37,017%) триваліше за одноточкове схрещування і на 43 покоління (23,757%) – за двоточкове.

Діаграми (рис. 4.12) вказують на те, що у ході оптимізації уся популяція від покоління до покоління починає зміщуватися в область нижчих значень витрат, тобто вона вся стає якіснішою. Так 1-а популяція повністю дає значення функції (4.1) між 43680 грн/доба і 47380 грн/доба, а 160 від 41500 грн/доба до 42520 грн/доба.

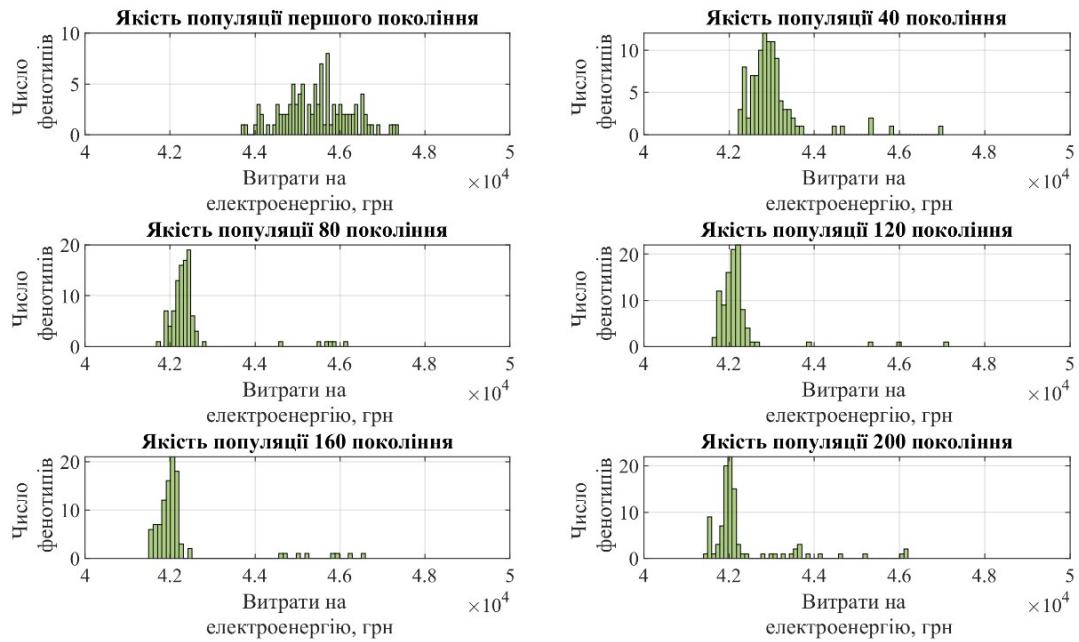


Рисунок 4.12 – Популяції під час оптимізації графіку роботи підземних приймачів напругою до 1000 В при залученні генетичного алгоритму зі схрещуванням за Лапласом, популяції 100 фенотипів і 10 елітних фенотипах у популяції

Пікове споживання потужності з графіку споживання ЕЕ (рис. 4.13), що отриманий після виходу з ГА, становить 654,5 кВт о 5 годині ранку, а мінімальне – 199 кВт о 16 годині.

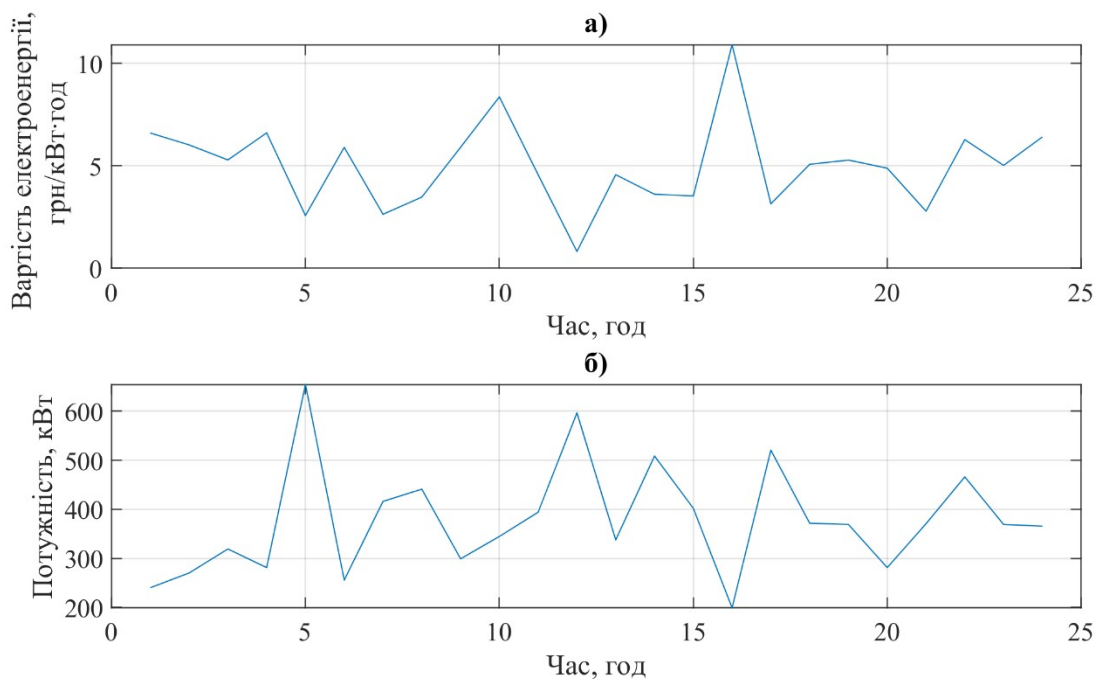
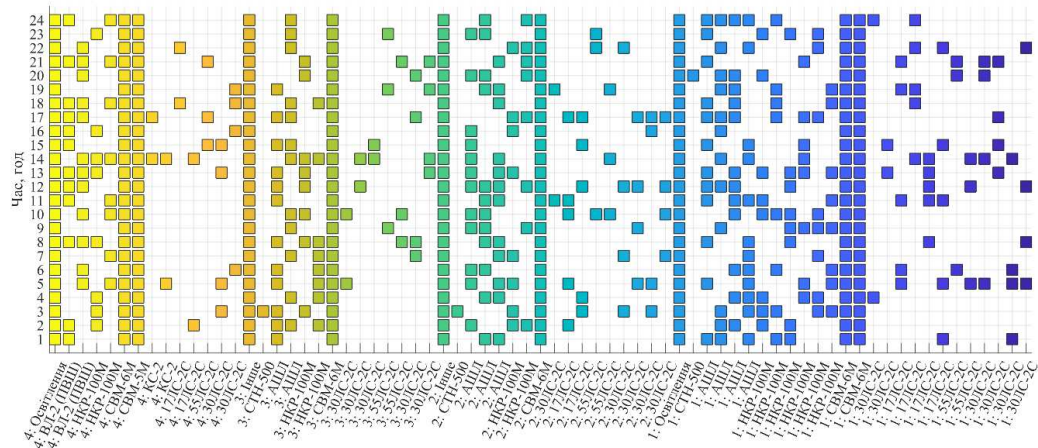


Рисунок 4.13 – Погодинні в добі вартості і потужності при керуванні енергоспоживанням підземних приймачів напругою до 1000В зі схрещуванням за Лапласом, популяції 100 фенотипів і 10 елітних фенотипах

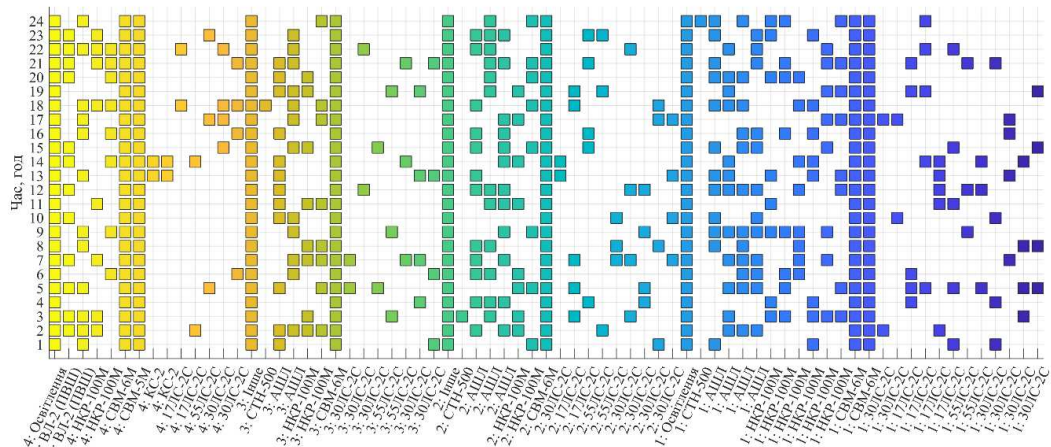
Можна стверджувати, що графік споживання ЕЕ більш оптимальний за ті, що були отримані при інших схрещуваннях. Тут ГА більше дотримується тарифного розподілу, тобто робить більшим споживання при низькій ціні і нижчим при високій.

4.3.2 Генетичний алгоритм з розміром популяції 100 фенотипів, число елітних фенотипів 5

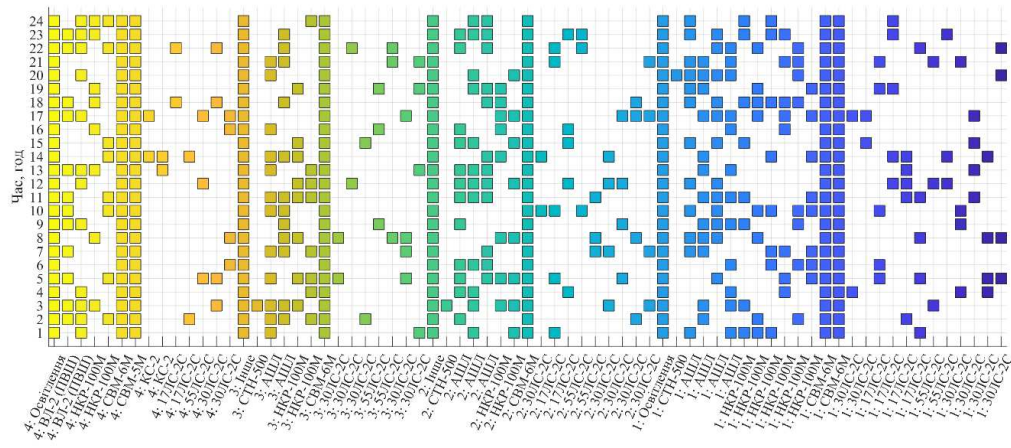
Знизимо число елітних фенотипів до 5 у популяції зі 100 фенотипів та проведемо порівняння ГА при трьох схрещуваннях. Результати показані у табл. 4.2 і на рис. 4.14 – рис. 4.17. Будемо розглядати та порівнювати одразу всю серію.



a)



6)



B)

Рисунок 4.14 – Графік роботи підземних приймачів з напругою живлення до 1000 В при задіянні генетичного алгоритму з популяцією 100 фенотипів і 5 елітних фенотипах: а) одноточкове схрещування; б) двоточкове схрещування; в) схрещування Лапласа

На рис. 4.15 а–в показаний процес зміни значення функції (4.1), котру дає найкращий фенотип у поколінні.

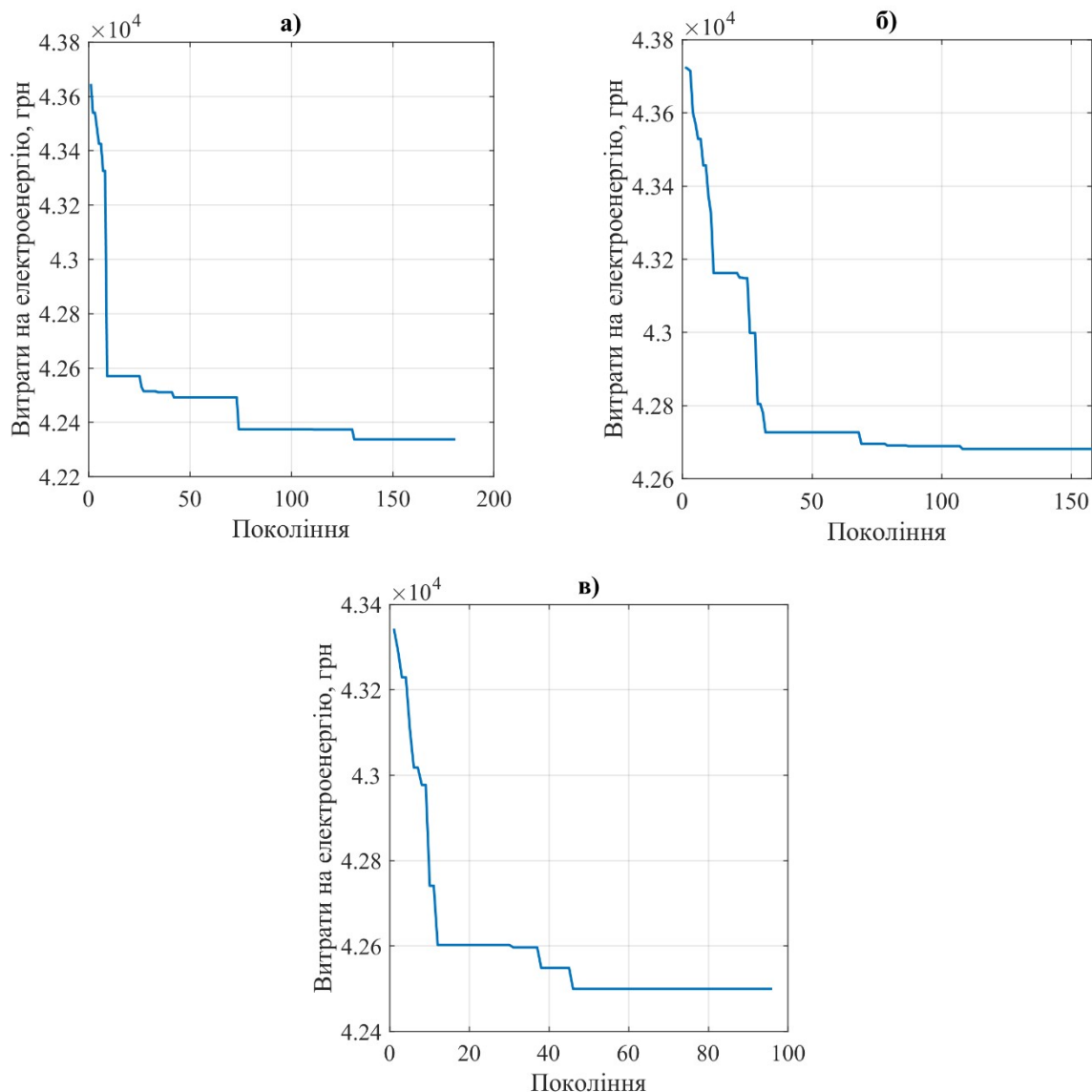
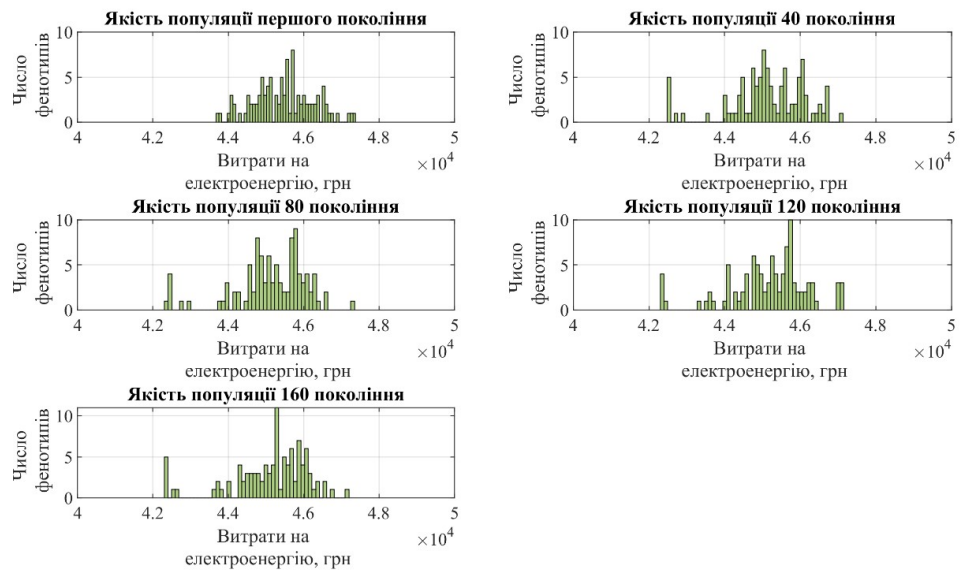


Рисунок 4.15 – Зміна мінімуму формули (4.1) під час залучення генетичного алгоритму з популяцією 100 фенотипів і 5 елітних фенотипах: а) однокоткове схрещування; б) двоточкове схрещування; в) схрещування Лапласа

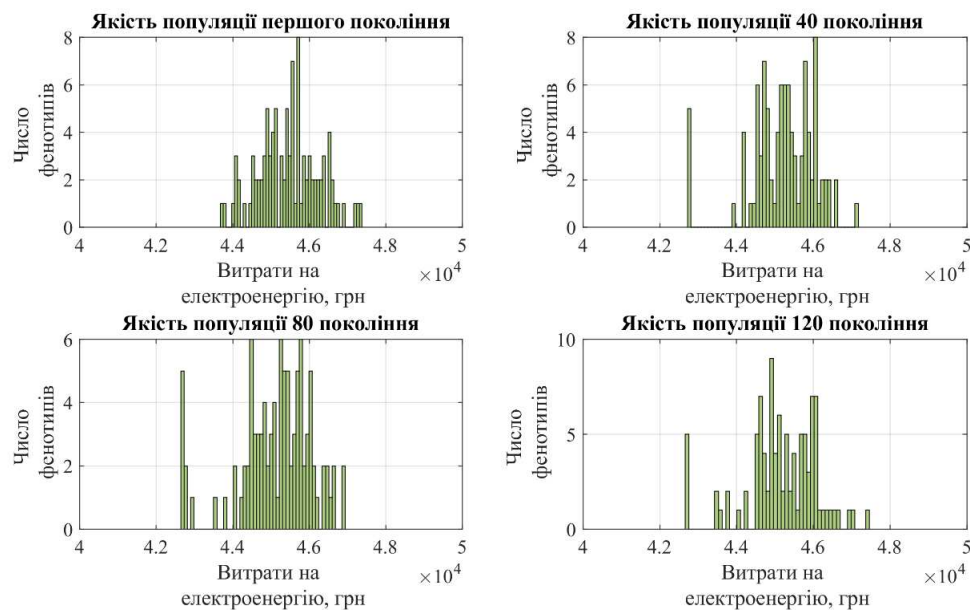
Зменшення елітних фенотипів погіршило якості ЕСК для двоточкового схрещування та схрещування Лапласа. Витрати у даних варіантах зросли на 0,215% з 42590,23 грн/доба до 42681,84 грн/доба, та на 2,52% з 41454,99 грн/доба до 42499,92 грн/доба, відповідно. Але сам пошук став скорішим. Для двоточкового схрещування він скоротився на 30 поколінь (21,74%), а для схрещування Лапласа на 135 поколінь (3,93 рази). При однокотковому

схрещуванні якості ЕСК поліпилася. Витрати на ЕЕ скоротилися на 0,422% з 42516,6 грн/доба до 42337,16 грн/доба. Проте ГА триваліше на 17 поколінь (на 14,91%) шукав мінімум формули (4.1).

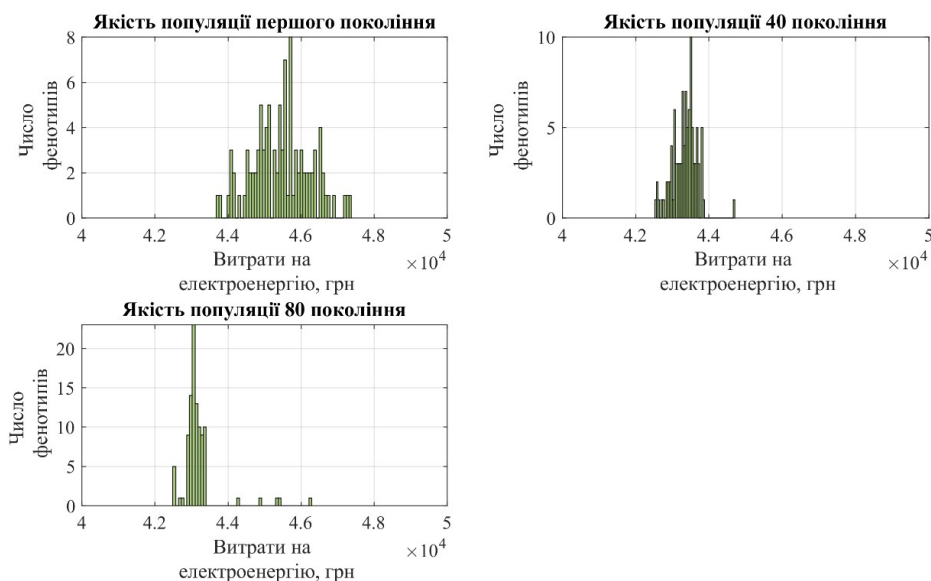
Зміна якості популяцій має такі самі тенденції, як і у ЕСК з п. 4.3.1. При одно- і двоточковому схрещуванні відбулося розділення популяції на дві групи (рис. 4.16 а і б). При схрещуванні Лапласа вся популяція стає якіснішою (рис. 4.16 в).



а)



б)



в)

Рисунок 4.16 – Популяції під час оптимізації графіку роботи підземних приймачів напругою до 1000 В при залученні генетичного алгоритму з популяцією 100 фенотипів і 5 елітних фенотипах: а) одноточкове схрещування; б) двоточкове схрещування; в) схрещування Лапласа

Порівнюючи графіки споживання ЕЕ при роботі ЕСК (рис. 4.17 а–в) встановлюємо, що зі зниженням елітних фенотипів відбулося зменшення пікової потужності: з 708,5 кВт до 661,5 кВт (на 6,634%) при одноточковому схрещуванні; з 592,5 кВт до 560 кВт при двоточковому (5,485%) та з 654,5 кВт до 566 кВт (13,522%) при схрещуванні за Лапласом.

Мінімальна потужність же зросла для відповідних схрещувань з 217,5 кВт до 229 кВт (5,287%), з 173 кВт до 218 кВт (26,012%) та з 199 кВт до 214,5 кВт (7,789%).

4.3.3 Генетичний алгоритм з розміром популяції 200 фенотипів, число елітних фенотипів 20

Збільшимо розміри популяції до 200 фенотипів, дотримаємося відсоткового співвідношення у 10% (20 фенотипів) для елітних фенотипів та дослідимо ЕСК для трьох схрещувань.

Результати наведені на рис. 4.18 – рис. 4.21 і у табл. 4.2. Порівняємо показники керування з випадком, коли розмір популяції складає 100 одиниць, а число елітних фенотипів 10 одиниць, як з більш якісним.

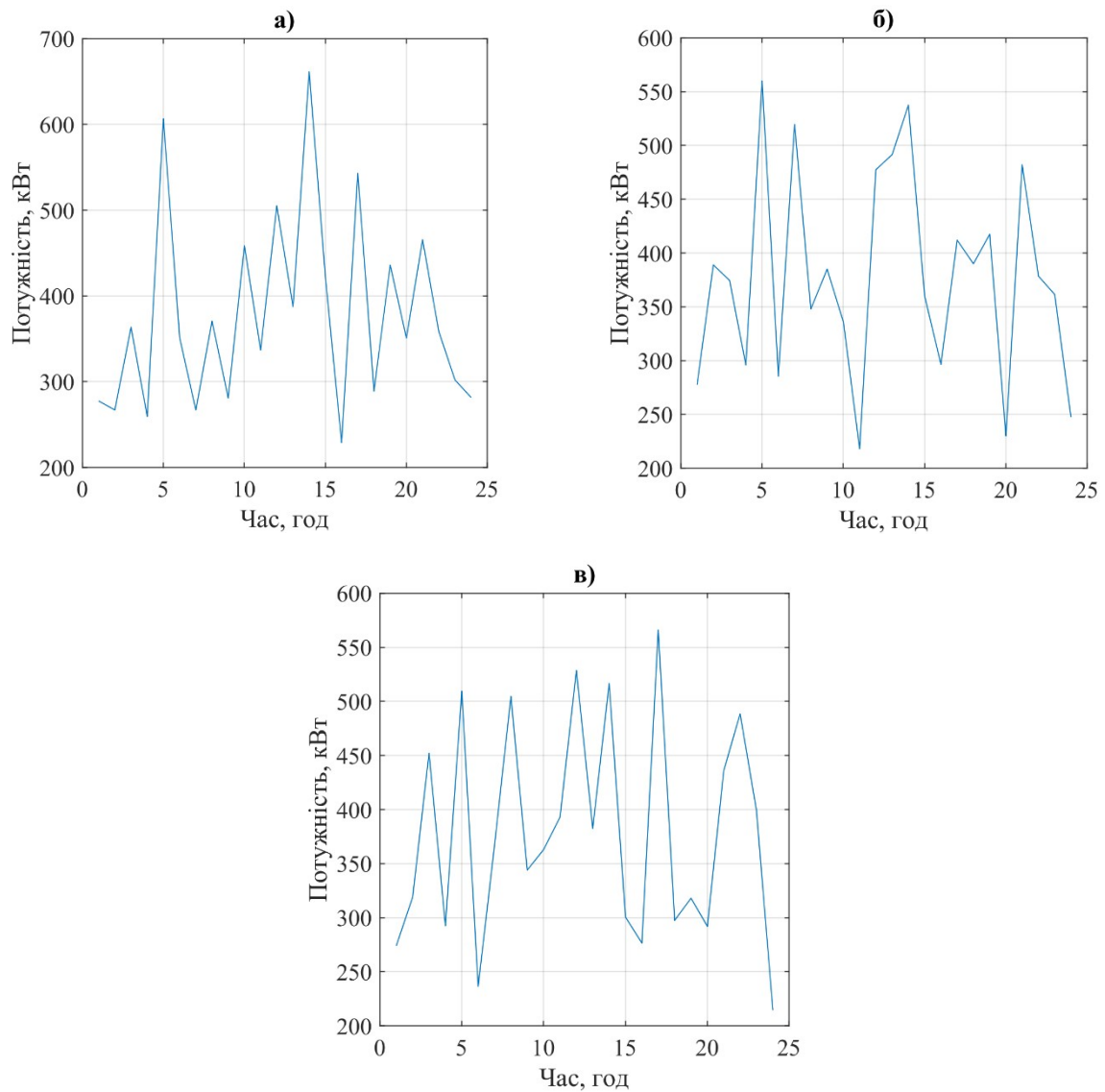


Рисунок 4.17 – Погодинна в добі потужність при керуванні енергоспоживанням підземних приймачів напругою до 1000В з задіянням генетичного алгоритму при популяції 100 фенотипів і 5 елітних фенотипах: а) одноточкове схрещування; б) двоточкове схрещування; в) схрещування Лапласа

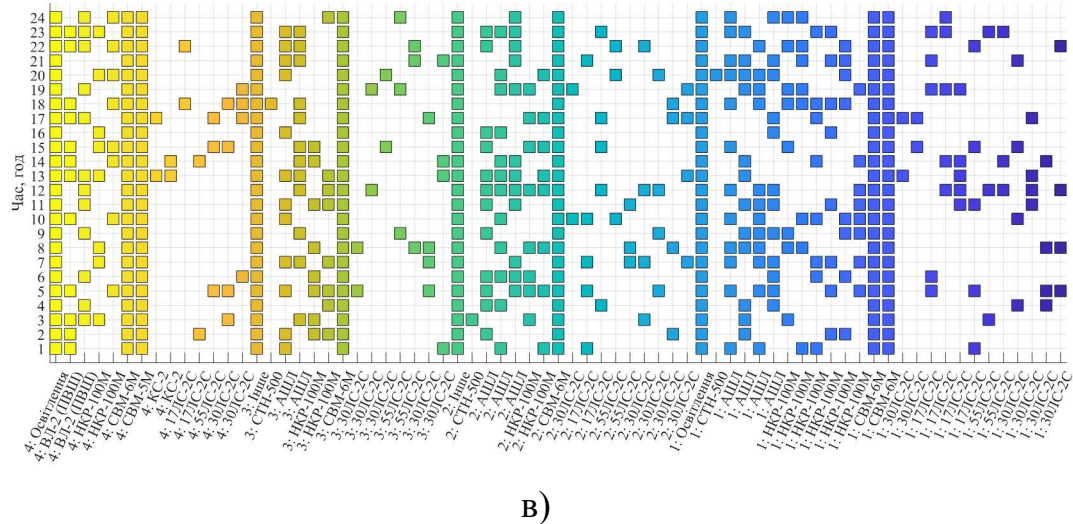
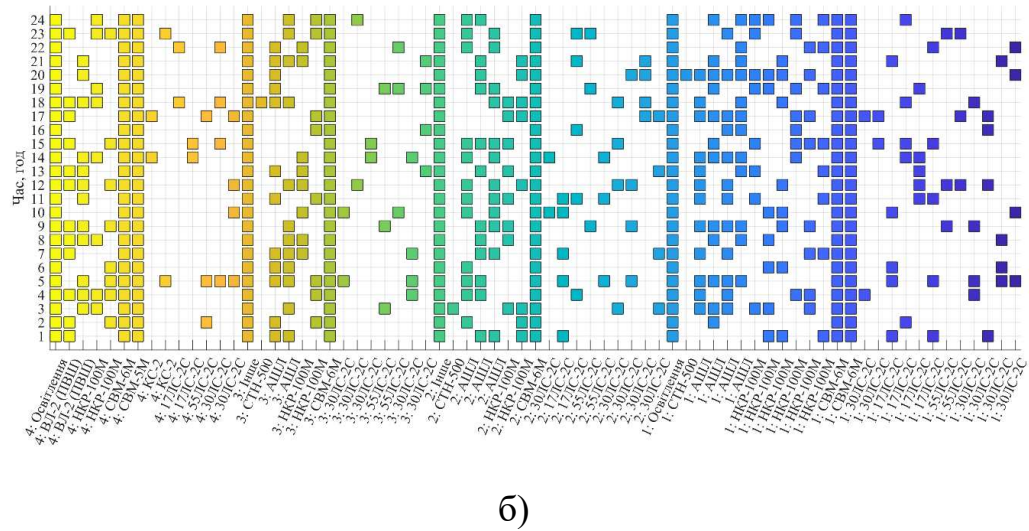
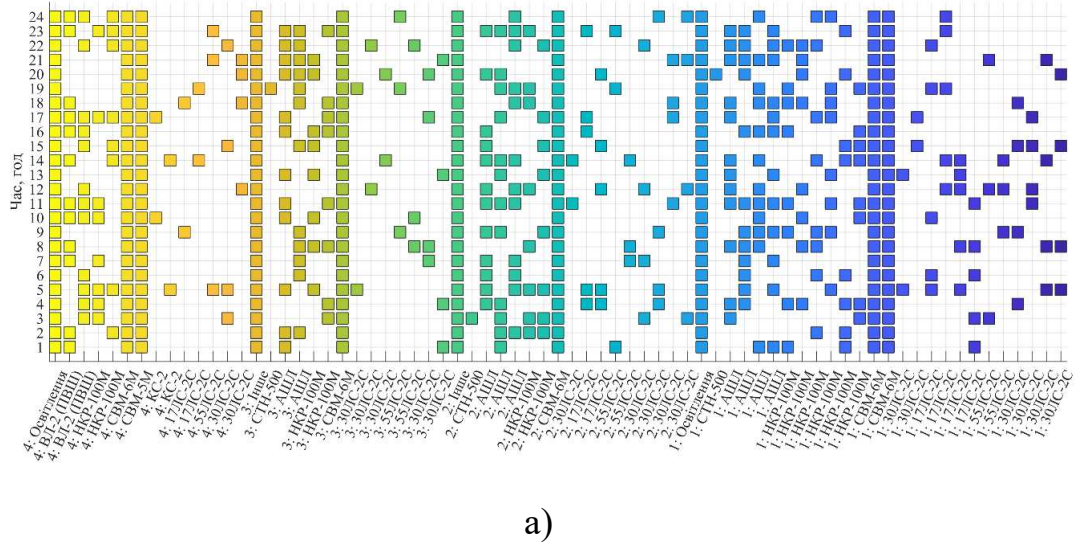


Рисунок 4.18 – Графік роботи підземних приймачів з напругою живлення до 1000 В при задіянні генетичного алгоритму з популяцією 200 фенотипів і 20 елітних фенотипах: а) одоточкове схрещування; б) двоточкове схрещування; в) схрещування Лапласа

Як свідчать графіки (рис. 4.19 а–в) витрати на ЕЕ після закінчення роботи алгоритму при одноточковому і двоточковому схрещуваннях скоротилися на 0,00228% і 0,169%, відповідно.

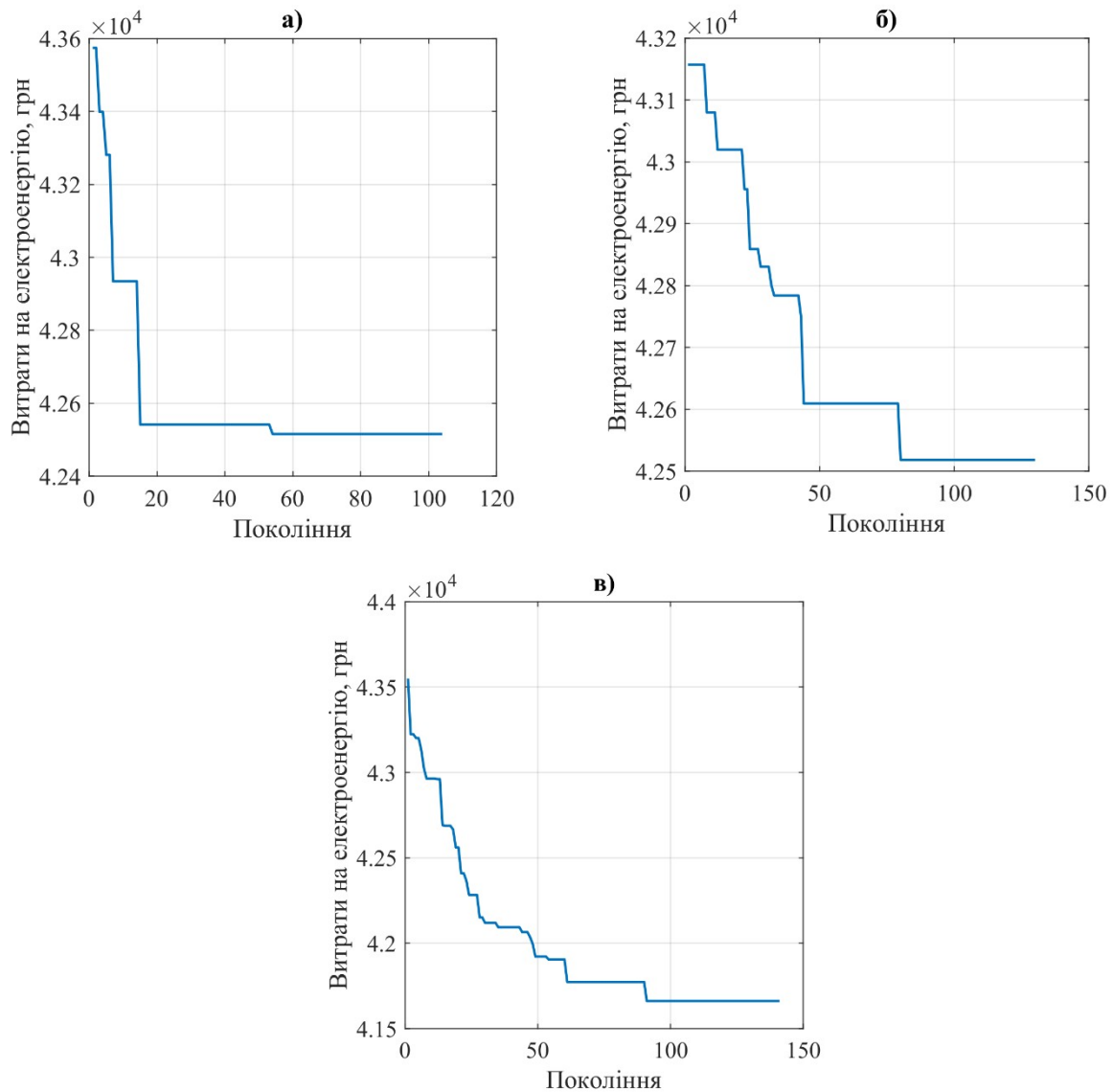
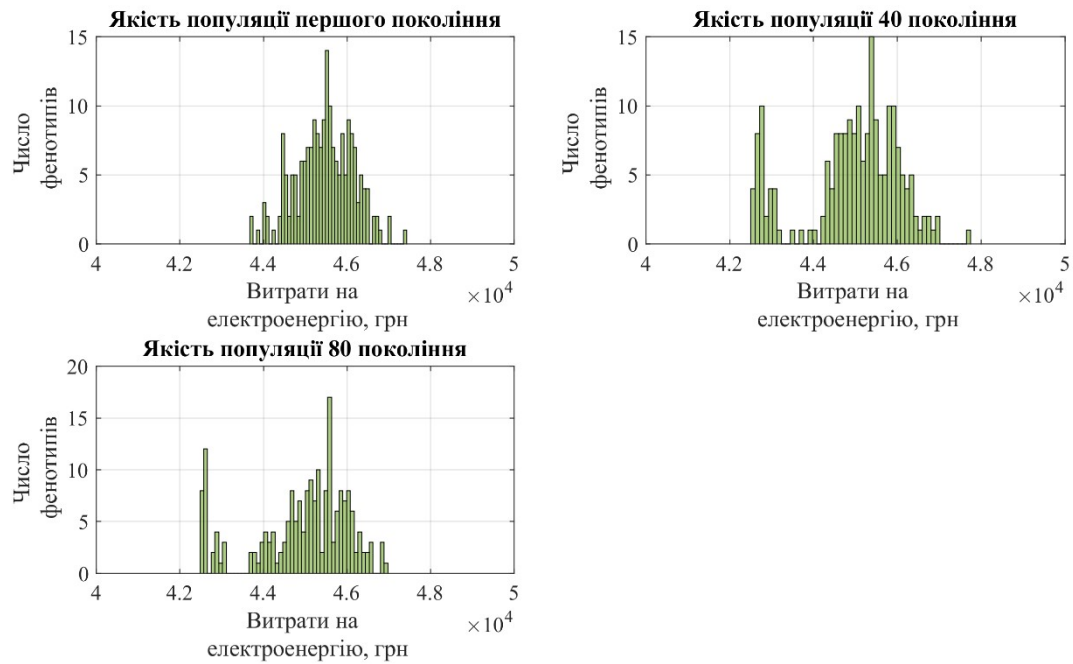


Рисунок 4.19 – Зміна мінімуму формули (4.1) під час залучення генетичного алгоритму з популяцією 200 фенотипів і 20 елітних фенотипах:

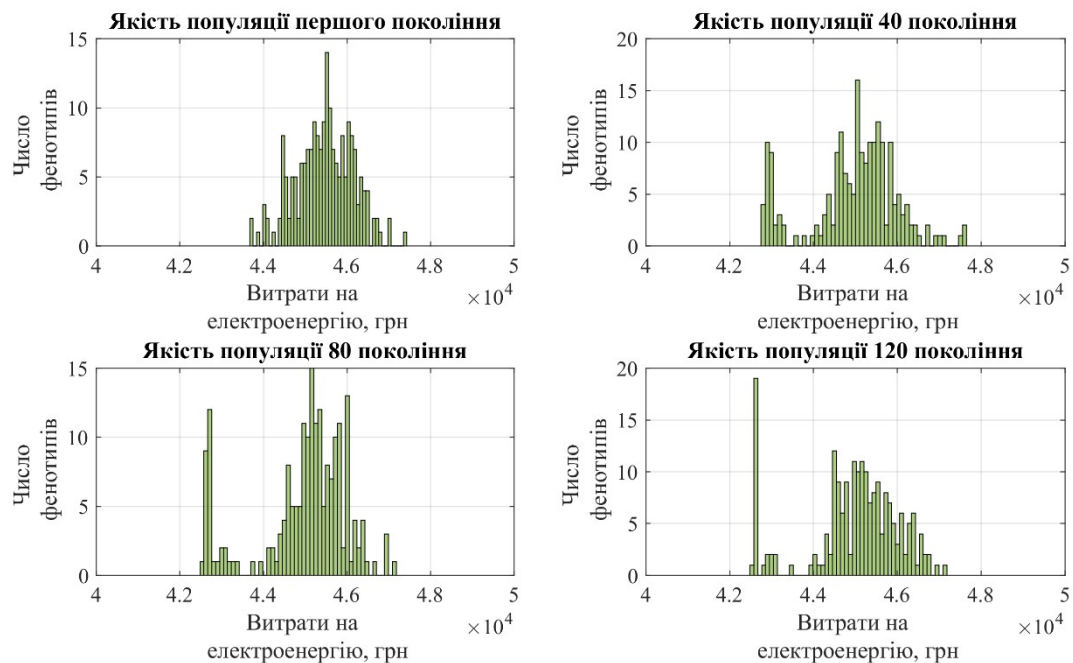
а) одноточкове схрещування; б) двоточкове схрещування; в) схрещування Лапласа

Також скоротилася тривалість пошуку зі 114 до 54 поколінь (на 52,63%) для одноточкового схрещування і зі 138 до 80 (42,03%) для двоточкового. Для схрещування Лапласа відбулося збільшення витрат на 0,498%, але тривалість

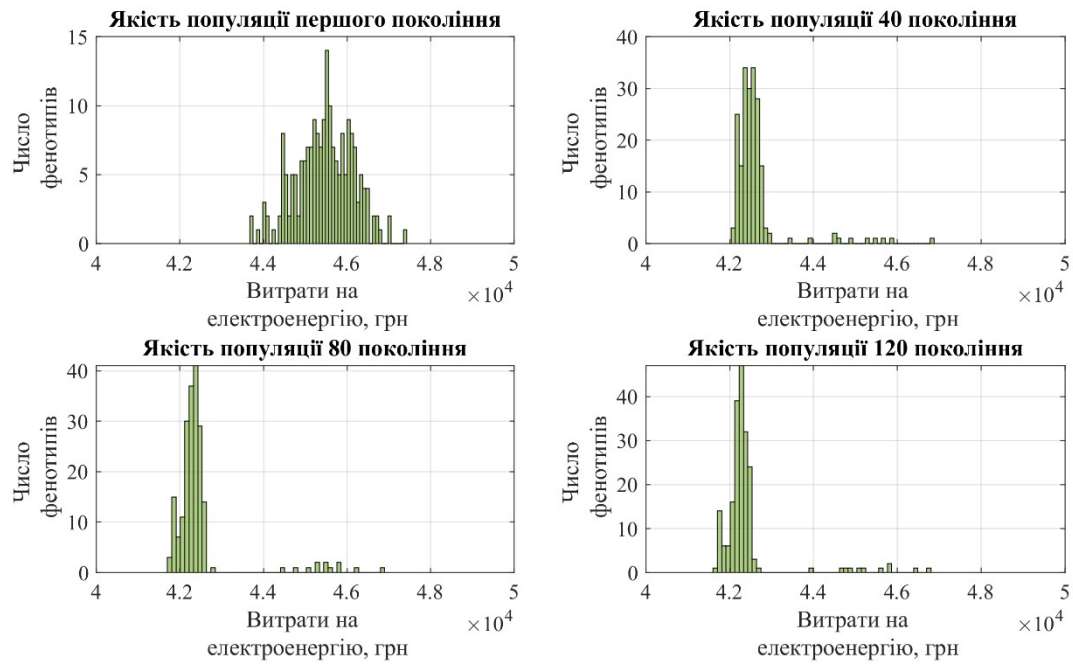
ГА зменшилася на 49,72% (з 181 покоління до 91). У загалі проведеного аналізу збільшення числа популяцій дало якіснішу роботу ЕСК, але зростає час обчислень. Так як проміжок для отримання даних і прийняття управлінського рішення тривалий (до 30 хвилин у системах АСКОЕ), то цей момент не погіршує роботу ЕСК.



а)



б)



в)

Рисунок 4.20 – Популяції під час оптимізації графіку роботи підземних приймачів напругою до 1000 В при залученні генетичного алгоритму з популяцією 200 фенотипів і 20 елітних фенотипах: а) одноточкове схрещування; б) двоточкове схрещування; в) схрещування Лапласа

З графіків споживання ЕЕ (рис. 4.25) видно, що для одноточкового схрещування і схрещування Лапласа знижується як пікове споживання, так і мінімальне у варіанті, коли розмір популяції 200 одиниць і число елітних фенотипів 20. Пікове на 15,46% і 13,29%, а мінімальне на 2,989% і 7,538%, відповідно.

4.3.4 Генетичний алгоритм з розміром популяції 200 фенотипів, без елітних фенотипів

На останок здійснимо дослідимо роботу ЕСК для оптимізації споживання ЕЕ приймачами до 1000В, коли елітних фенотипів немає. Популяція залишається 200 фенотипів. Результати роботи ГА для трьох схрещувань наведені на рис. 4.22 – рис. 4.25 і в табл. 4.2.

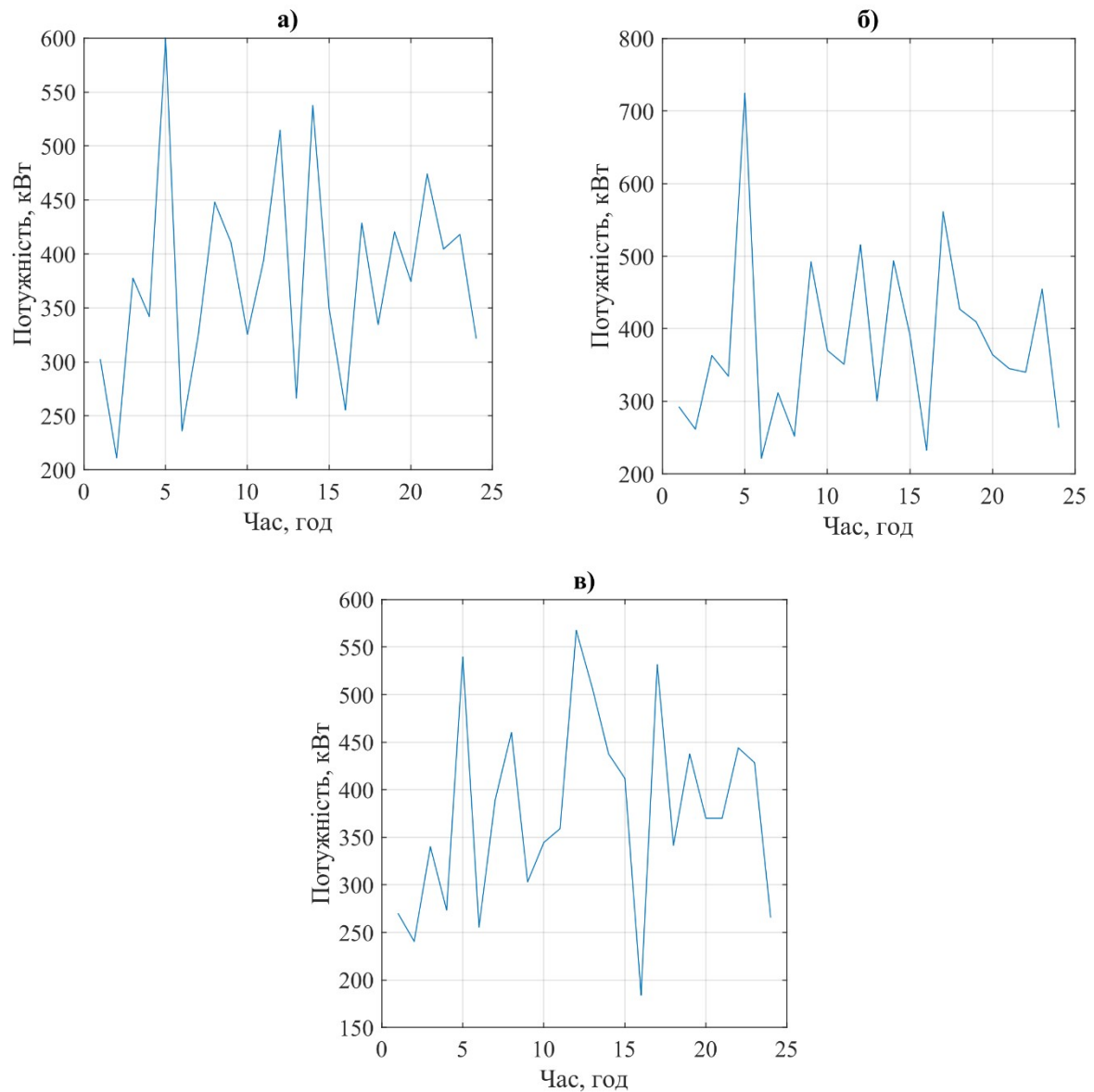
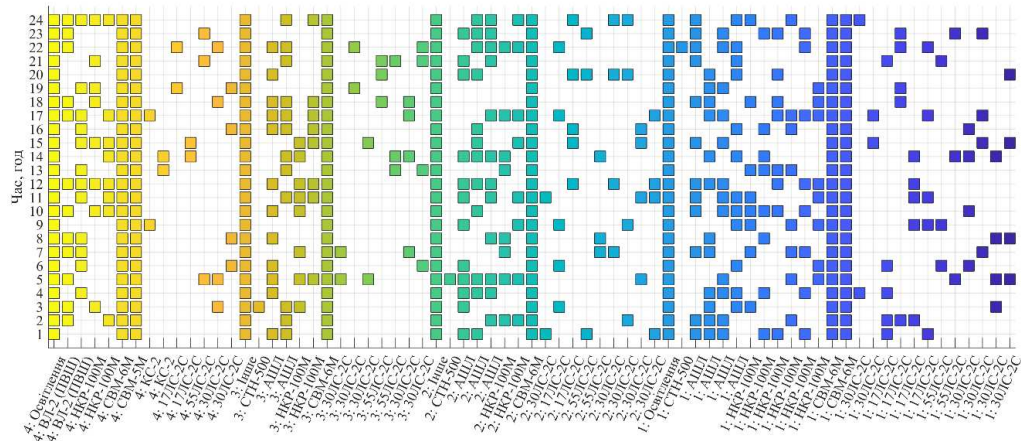
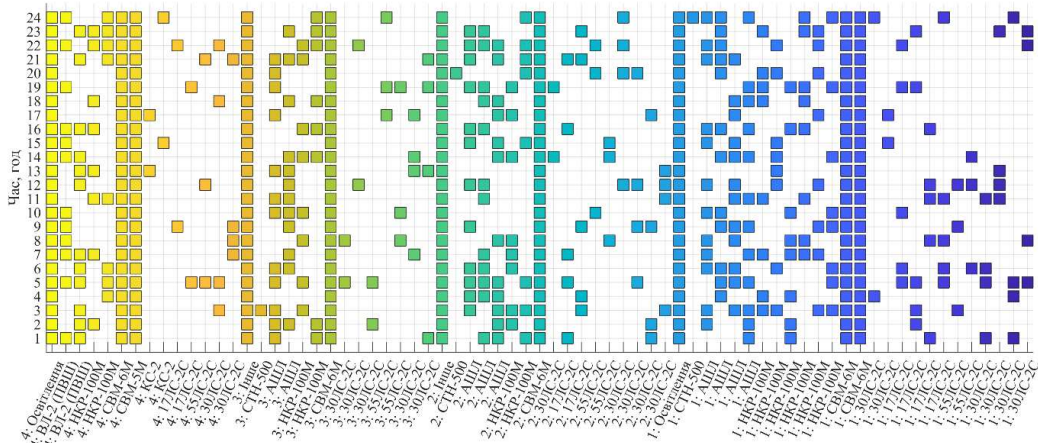


Рисунок 4.21 – Погодинна в добі потужність при керуванні енергоспоживанням підземних приймачів напругою до 1000В з задіянням генетичного алгоритму при популяції 200 фенотипів і 20 елітних фенотипах:
 а) одноточкове схрещування; б) двоточкове схрещування; в) схрещування Лапласа

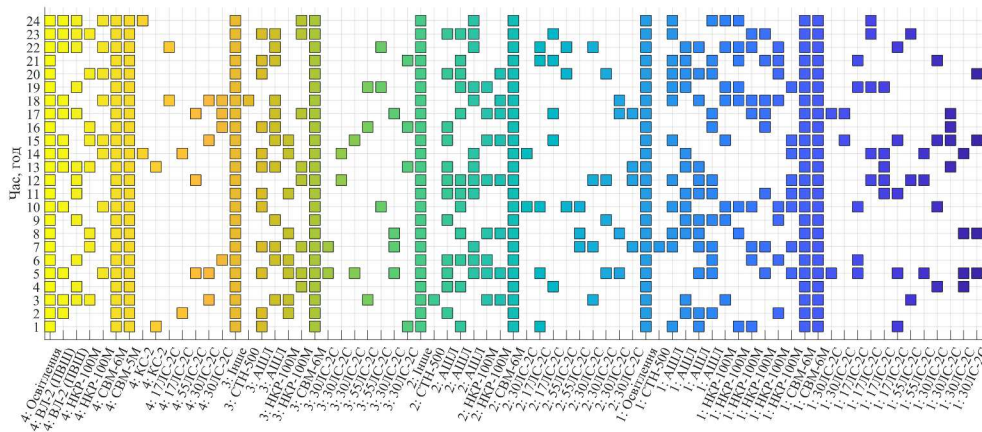
З рис. 4.19 знаходження мінімуму (4.1) ЕСК на кожному з поколінь видно, що без елітних фенотипів ГА має нестійкість. Особливо при одно- і двоточковому схрещуваннях. Внаслідок цього ГА завершує роботу тільки при межевому поколінні.



а)



б)



в)

Рисунок 4.22 – Графік роботи підземних приймачів з напругою живлення до 1000 В при задіянні генетичного алгоритму з популяцією 200 фенотипів і 0 елітних фенотипів: а) одноточкове схрещування; б) двоточкове схрещування; в) схрещування Лапласа

У табл. 4.2 занесені значення витрат саме у фінальний момент роботи алгоритму. Вони найбільші з усіх, що були отримані раніше. Але це не є мінімальні значення зафіксовані під час еволюції.

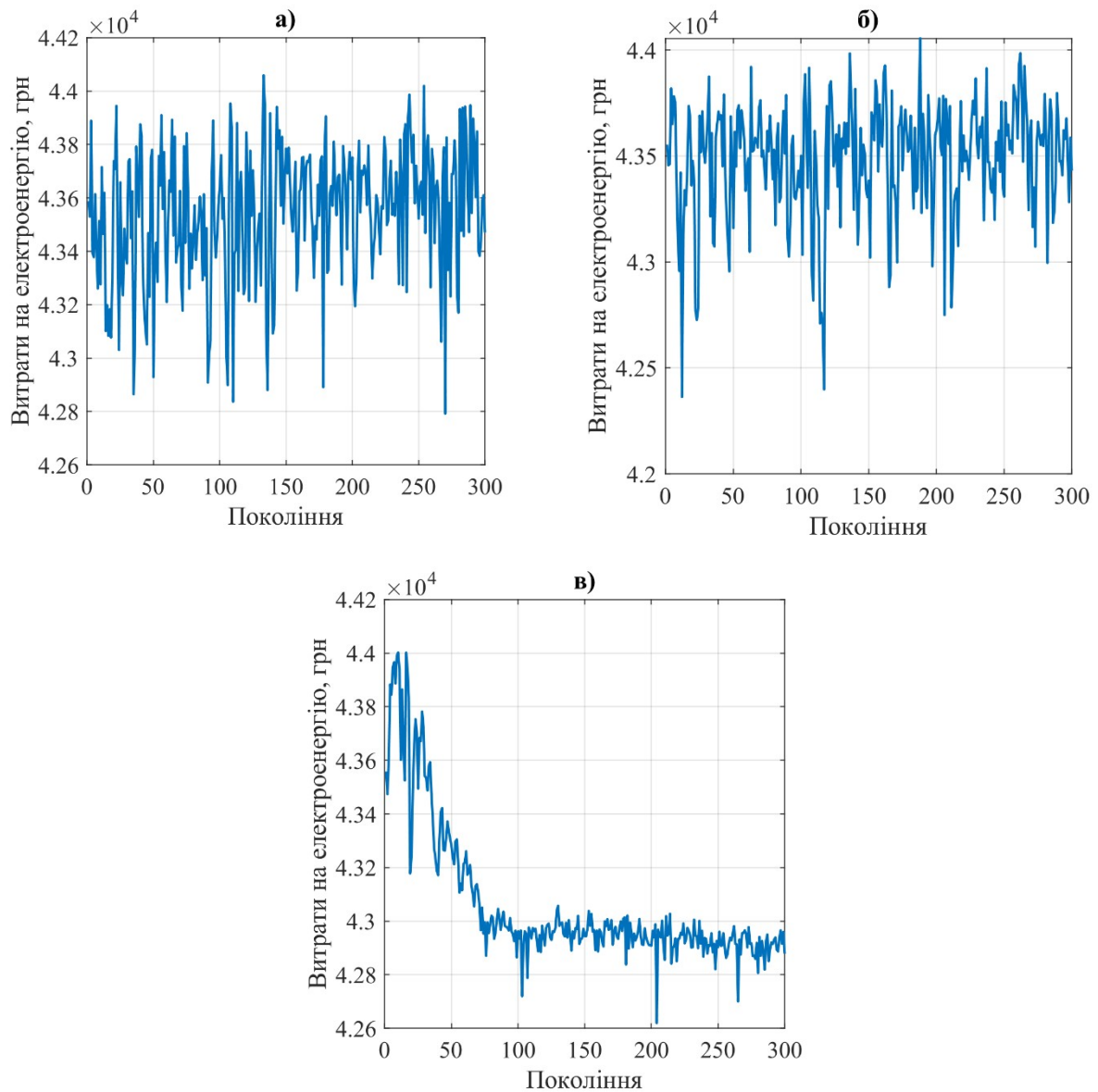
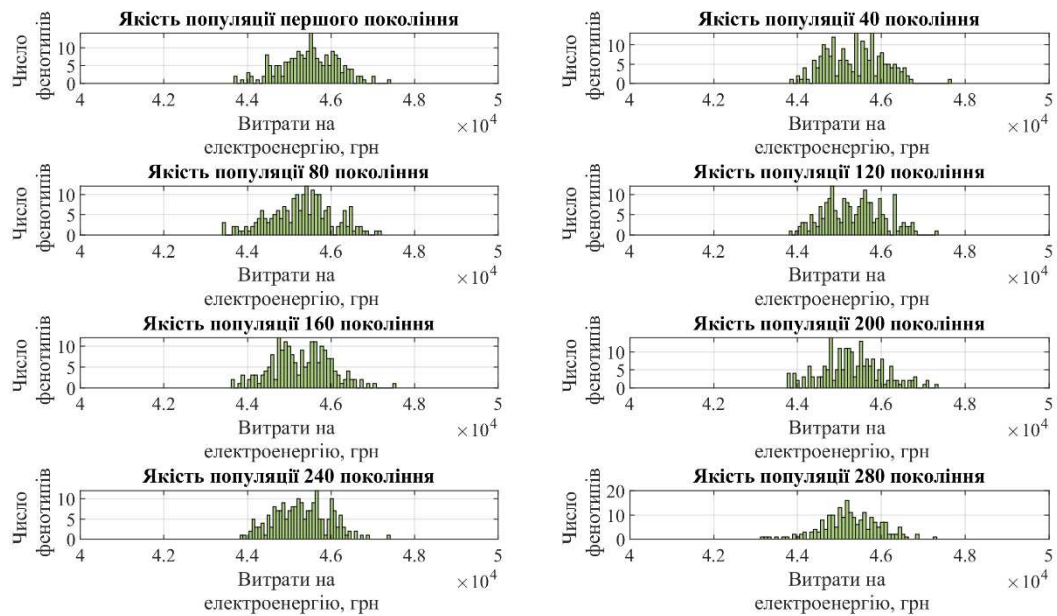


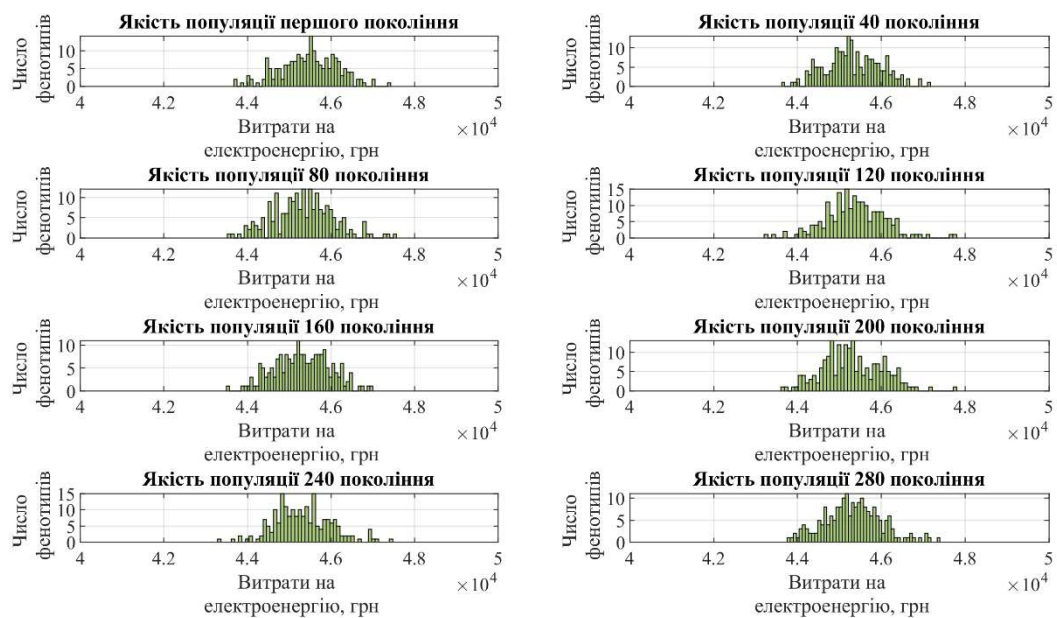
Рисунок 4.23 – Зміна мінімуму формули (4.1) під час залучення генетичного алгоритму з популяцією 200 фенотипів і 0 елітних фенотипах: а) одноточкове схрещування; б) двоточкове схрещування; в) схрещування Лапласа

При одноточковому схрещуванні найнижчі витрати були на 270 поколінні і дорівнювали 42792,1 грн/добу, при двоточковому на 12 поколінні, що дуже рано, 42363 грн/добу, а при схрещуванні Лапласа 42619,6 грн/добу на

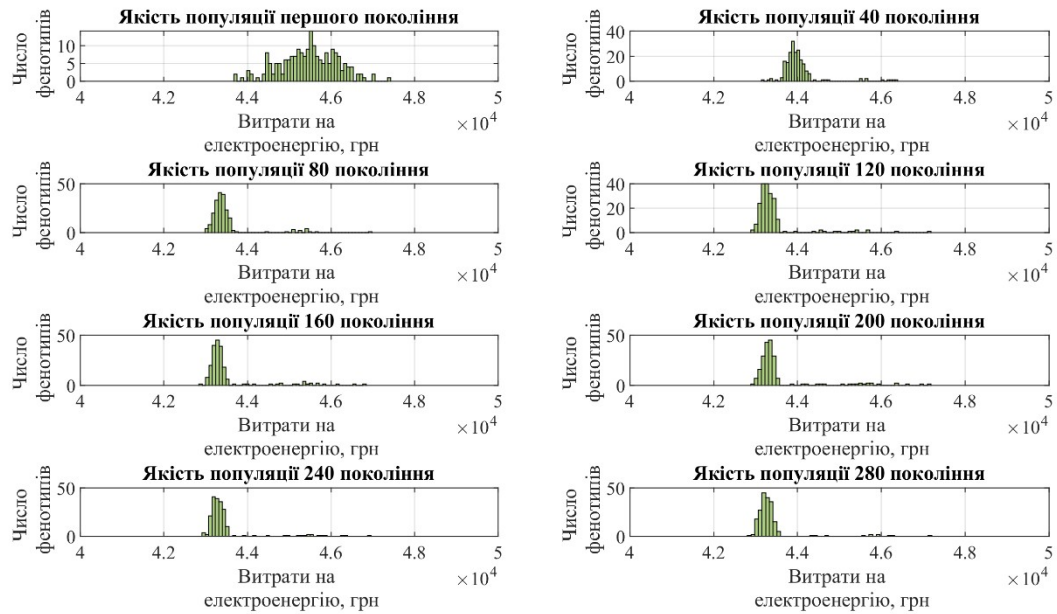
204 покоління, що є не найгіршими результатами. І тільки для останнього схрещування (рис. 4.19 в) спостерігається рух у мінімум функції (4.1).



а)



б)



в)

Рисунок 4.24 – Популяції під час оптимізації графіку роботи підземних приймачів напругою до 1000 В при залученні генетичного алгоритму з популяцією 200 фенотипів і 0 елітних фенотипів: а) одноточкове схрещування; б) двоточкове схрещування; в) схрещування Лапласа

Зазначаю також, що графік споживання ЕЕ (рис. 4.25) при одноточковому і двоточковому схрещуванні є більш рівномірним.

Отже відзначу, що без елітних фенотипів алгоритм має неякісні показники роботи і тому не може бути рекомендований до застосування в ЕСК при керування електроспоживанням підземних приймачів напругою до 1000В.

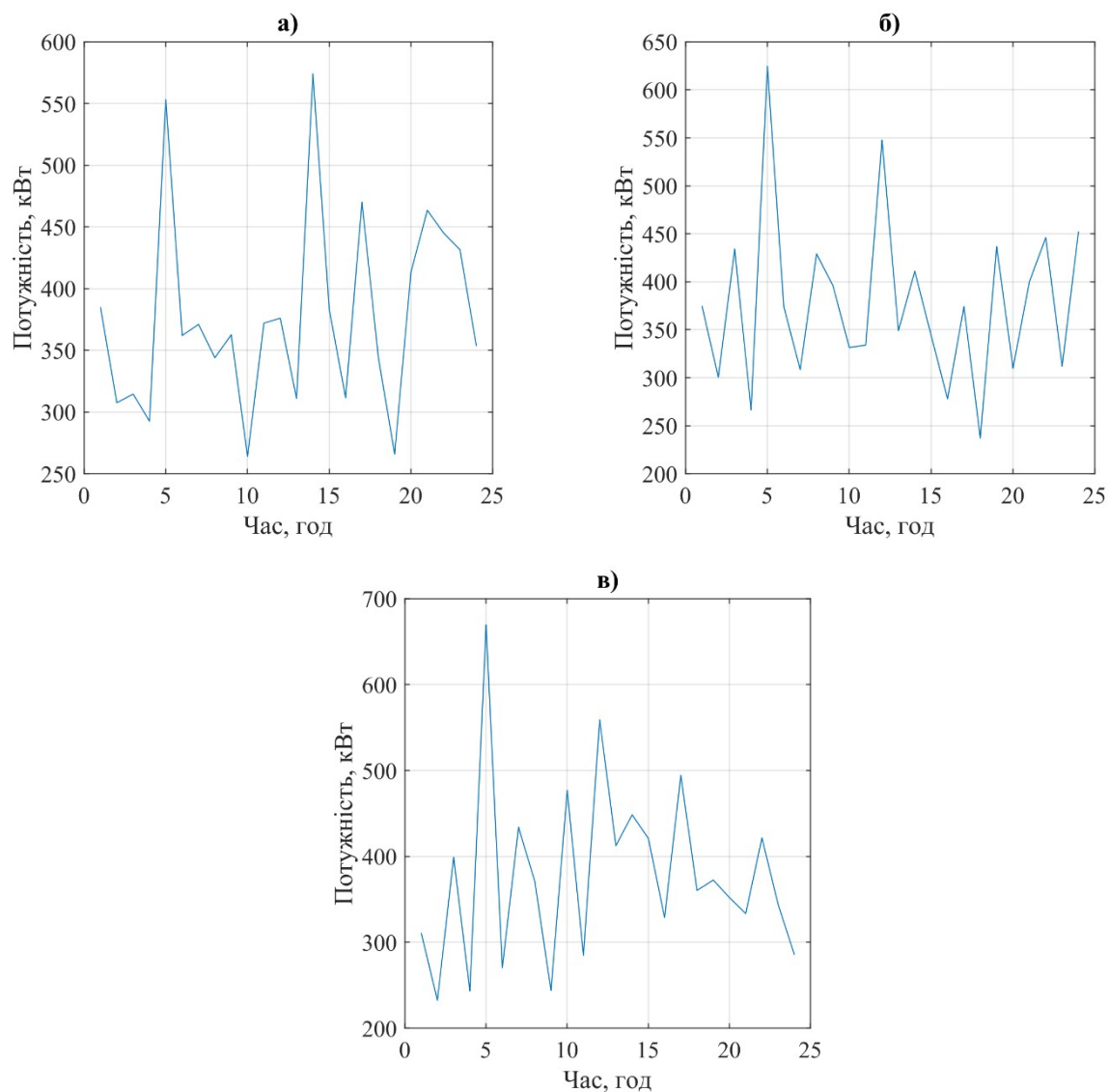


Рисунок 4.25 – Погодинна в добі потужність при керуванні енергоспоживанням підземних електроприймачів напругою до 1000 В з задіянням генетичного алгоритму при розмірі популяції 200 фенотипів і без елітних фенотипів у популяції: а) одноточкове схрещування; б) двоточкове схрещування; в) схрещування Лапласа

4.4. Обговорення результатів

Найнижчі витрати на ЕЕ, а саме 41454,99 грн/доба, фіксувалися при популяції у 100 фенотипів, кількості елітних фенотипів 10 і використанні схрещування Лапласа. Найвищі витрати 43470,55 грн/доба були при величині популяції 200, 0 елітних фенотипів і одноточковому схрещуванні. Різниця між

найгіршим і найкращим результатами 2015,56 грн/доба, що є 4,86% від найліпшого значення. Це вказувало на те, що параметри ГА суттєво впливали на якість мінімізації (4.1).

Співставляючи вплив схрещування на витрати на ЕЕ підземного гірничорудного підприємства при фіксації інших параметрів, було виявлено перевагу схрещування Лапласа. Наприклад, при розмірі популяції 100 і 10 елітних фенотипах, схрещування Лапласа забезпечило витрати на ЕЕ 41454,99 грн/доба, що дало змогу зменшити витрати на ЕЕ на 287,61 грн/добу (або на 0,68%) і на 1135,24 грн/доба (2,67%), якщо співставляти, відповідно, з одноточковим і двоточковим видами схрещування. Така сама тенденція здебільшого виявлялася і при інших налаштуваннях ГА. Схрещування Лапласа переважно давало ліпші результати. Але були і протилежні випадки. Так, коли розмір популяції був 100, а елітних фенотипів 5, то найнижчі витрати на ЕЕ (42337,16 грн) були зафіксовані при одноточковому схрещування, що було на 0,38% (42499,92 грн) і 0,81% (42681,84 грн) нижче за схрещування Лапласа і двоточкове схрещування.

Вплив числа елітних фенотипів також виявився суттєвим. Коли популяція становила 200 фенотипів при 0 елітних фенотипів, витрати на ЕЕ на добу були найбільшими і складали 43259,67 грн. Коли число елітних фенотипів зросло до 20, то витрати на ЕЕ скоротили до 42231,77 грн, що дало економію у 2,38%. При популяції 100 фенотипів, то також нижчими витрати на ЕЕ були тоді, коли в ГА були елітні фенотипи, а саме 10 елітних фенотипів. Проте, різниця у витратах на ЕЕ між оптимізацією ГА з 5 і 10 елітними фенотипами лише 0,3% в середньому.

Розглядаючи швидкість роботи ГА, то найшвидше оптимізація здійснюється при популяції 100 фенотипів, 5 елітних фенотипах і схрещуванні Лапласа всього тільки через 46 поколінь. Найбільш повільно – при популяції 200 фенотипів і 0 елітних фенотипах – ГА не завершиться раніше за 300 поколінь у трьох розглянутих варіантах. Це вказує на те, що елітні фенотипи не тільки поліпшують якість рішення, але й пришвидшує оптимізацію. Для

прикладу, при популяції 200 фенотипів і схрещуванні Лапласа зростання елітних фенотипів з 0 до 20 скоротила кількість поколінь на 69,7%.

Аналізуючи потужності, котру споживають приймачі з напругою до 1000 В, можна побачити, що найнижчу потужність, котра доволі часто корелює із витратами на ЕЕ, не завжди співпадає з найменшими витратами на ЕЕ, так як вони залежать також від тарифів.

Так, при популяції 200 фенотипів і 0 елітних фенотипів при оптимізації ГА середнє значення потужності було найнижчим, якщо точно, то у межах 80,14...104,60 кВт в залежності від схрещування, але витрати на ЕЕ – найбільші, що свідчило про значні пікові навантаження (гранична максимальна потужність у зазначених варіантах була у межах 574...669,5 кВт). Навпаки, у найкращому варіанті (популяція 100 фенотипів, 10 елітних фенотипів, схрещування Лапласа) пікова потужність була на рівні 654,5 кВт, проте мінімальна при цьому становила 199 кВт, і вартість ЕЕ була найнижчою, що вказує на більшу збалансованість добового споживання потужності, коли проводилась оптимізація.

4.5 Висновки до розділу 4

1. Найбільш ефективними при евристичному керуванні споживанням електроенергії підземними електроприймачами залізрудних шахт з напругою живлення до 1000 В на базі генетичного алгоритму є схрещування Лапласа і дотриманням 10% числа елітних фенотипів у популяції. При чому, при найменшому розмірі популяції точність ліпша при застосуванні саме схрещування Лапласа, а при одно- і двоточковому схрещуванні гірша, але не значно (не більше 0,2%). Але зі зростанням елітних фенотипів скорочується тривалість еволюційного пошуку під час керування, при деяких схрещуваннях, практично у два рази, що суттєво, якщо розглядати варіант створення системи керування на персональному комп'ютері або промисловому логічному контролері.

2. Найгіршу якість має варіант налаштувань, коли елітних фенотипів взагалі немає. Такий генетичний алгоритм нестійкий, рух до мінімуму оптимізуємої функції не здійснюється взагалі при одно- і двоточковому схрещуванні, при схрещуванні Лапласа він дуже повільний.

3. Зі скороченням відсотку елітних фенотипів у популяції якість алгоритму знизилася при двоточковому схрещуванні та схрещуванні Лапласа, а при одноточковому – покращилася, що пояснюється більш тривалою еволюцією ніж у випадку більшого числа елітних фенотипів у останньому випадку і коротшою у перших двох.

4. Рівні споживання електроенергії приймачами до 1000В розподілялася генетичним алгоритмом таким чином, що обмеження на допустиму потужність не перевищувала встановленого у 800 кВт значення. При схрещуванні Лапласа графік споживання електроенергії у більшій мірі відповідає добовому розподілу ціни електроенергії.

5. Виконаний етап дослідження показав і підтвердив той факт, що створена система керування процесом підключення підземних приймачів залізорудної шахти напругою живлення до 1000 В до шахтної електроенергосистеми дозволяє визначити оптимальний графік споживання електроенергії для мінімізації витрат на електроенергію, таким чином знизивши собівартість видобутку залізної руди підземним способом.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі на основі теоретичних та експериментальних досліджень в умовах діючих вітчизняних залізрудних підприємств із підземними способами видобутку залізної руди оцінено реально існуючий характер процесу електропостачання – електроспоживання приймачами дільничних підземних підстанцій напругою живлення до 1000 В, обґрунтовано та сформовано, як варіант у вирішенні наукової проблеми, наукову задачу – підвищення, в кінцевому форматі, електроенергоефективності видобутку залізної руди в умовах даних видів гірничих підприємств. У процесі наукового пошуку отримано наступні узагальнюючі результати:

1. Обґрунтована та сформована в процесі досліджень і пропонуєма для практичної реалізації «дорожня карта» наукового пошуку, базуючись на результатах проведеного аналізу результатів перфектних пошуків попередніх досліджень та авторського оцінювання існуючого функціонального стану електроенергетичного комплексу таких складних по технології ведення робіт як підприємства з підземним способом видобутку залізної руди, дозволила окреслити схему для визначення шляхів підвищення електроенергетичних показників зазначеного комплексу з попереднім оцінюванням реальних можливостей використання його ресурсного енергетичного потенціалу. Пропонуєма схема пошуку доповнює дієвий та перспективний, в своєму кінцевому рішенні, варіант покрокового досягнення зазначеної мети шляхом розробки сегментних рішень – складових узагальненого процесу керування розподілом електроенергопотоків та режимів функціонування споживачів електроенергії загальношахтної системи електропостачання з конкретикою рішень для споживачів із напругою живлення до 1000 В, котрі отримують живлення від дільничних підземних підстанцій.

2. Розвинена в сфері свого застосування та пропонуєма для подальшої практичної реалізації методика як локального, так і комплексного оцінювання процесу електропостачання – електроспоживання приймачів електричної енергії з напругою живлення до 1000 В та підземного залізрудного

підприємства в цілому. Підґрунтям означеної методики є встановлення статистичної неоднорідності цього процесу, що дозволило забезпечити генерацію інформаційних моделей в умовах невизначеності та неповноти інформації. Практико-теоретичні дослідження підтвердили адекватність дослідницьких моделей, тобто достатню відповідність до реальних умов і режимів споживання електроенергії підземних гірничорудних підприємств, що, в свою чергу, обумовило доцільність розбудови алгоритму керування цим процесом, який дозволяє адекватно враховувати поточні зміни параметрів функціонування технологічних споживачів електроенергії та розбудувати схему поточного керування електроенергопотоками між вищезазначеними приймачами загальношахтного комплексу: електропостачання – електроспоживання даних видів підприємств.

3. У результаті досліджень у царині технології функціонування споживачів із напругою живлення до 1000 В щодо процесу електропостачання – електроспоживання, науково-практичних досліджень у галузі стратегії електроенергоспоживання і застосування ресурсного потенціалу вищенаведеного електроенергетичного комплексу, змістовності інформаційних технологій та їх відповідного значення щодо становлення і розвитку сьогочасного формату електрозабезпечення залізрудних підприємств із підземними способами видобутку залізної руди вдосконалено апарат розуміння щодо аналізу узагальненого формату процесу електропостачання – електроспоживання. Запропоновано авторський підхід до дефініції щодо визначення моніторингу відповідно до рівнів електроспоживання для підприємств залізрудної галузі як процесу безперервного відслідковування за головними елементами реалізації політики ефективно-економічного електроспоживання, реєстрації змін, що відбулися протягом спостереження, оцінювання проміжних локальних результатів задля визначення проблем і змін щодо витримання рекомендуємих контрольних завдань із метою забезпечення ефективного комплексного керування процесом електропостачання – електроспоживання з урахуванням

споживачів електроенергії з напругою живлення до 1000 В підземних дільничних підстанцій.

4. Доведено, що для визначення результативності споживання електроенергії приймачами з напругою до 1000 В дільничних підземних підстанцій доцільно й необхідно проводити дослідження та аналіз показників рівнів коливань споживання електроенергії в часі – годинах доби. Запропоновано модель моніторингу відповідного процесу електропостачання – електроспоживання задля розробки схеми ефективного вдосконалення програмованого керування електроенергетикою даних видів гірничих підприємств. В основу моделі покладена змістовна інтерпретація співвідношень показників рівнів електроспоживання та обсягів видобутку залізної руди, що відповідною мірою справджують критерії успішності. Систематизація показників електроспоживання, що використовувались при складанні моделі, забезпечується виокремленням системних формацій, що передбачаються типовою усталеною виробничою системою, а саме: вхід, вихід, устаткування, впорядкованість, каталізатор, суб'єктивний фактор. Використання наукового підходу, який запропонований відповідно до виконання політики електроспоживання для підземних залізрудних підприємств, дозволить оцінювати відповідний стан енергетичного комплексу електропостачання – електроспоживання. Запропонований системно-синергетичний підхід відповідає сучасній стратегії розвитку системи електрозабезпечення, дозволяє обрати раціональну структуру показників, які віддзеркалюють поточний стан електроспоживання підприємства. Практичне застосування моделі засвідчило її ефективність, комплексність і системність. Різноміжні темпи зростання показників, що відображають стан енергетичної системи, підтверджують практичну функціональність моделі та характеризують результативність керування внутрішньою електроенергетикою підприємства. Формалізація процесу електроенергетичного розвитку даних видів підприємств будується як відкрита та нерівноважна система. Відповідно до теорії самоорганізації процес

розвитку комплексу електроенергопостачання – електроспоживання аналізованого виду гірничого підприємства здійснюється виключно через нестійкість його стану. Основними принципами, що притаманні процесу електроенергопостачання підприємства, є відповідно: незворотність, випадковість, невизначеність, нелінійність.

5. Доведена гармонізація інформаційно-аналітичного комплексу моделей, яка покладена в основу формування методології в системі нової парадигми науково-практичного аналізу споживання електроенергії складовими електроенергетичної системи залізрудних підприємств, дозволила довести наступне: для реалізації раціональних i_x управлінських рішень щодо споживання електроенергії необхідно застосовувати комплекс методів і моделей, які гармонізують інформаційно-аналітичне підґрунтя для визначення оптимальних складових споживання електроенергії. Окремі моделі без співвідношення з галузевими особливостями і врахуванням можливого впливу зовнішнього середовища не в змозі забезпечити комплексний системний аналіз споживання електроенергії. Запропонований інформаційно-аналітичний комплекс моделей складає методологічні основи нової парадигми науково-практичного аналізу споживання електроенергії.

6. Розроблено й впроваджено методологію оцінювання стратегії процесу електропостачання – електроспоживання підземних залізрудних підприємств на засадах системно-синергетичного підходу. Це дозволило сформулювати систему моделей щодо стратегічного розвитку енергозабезпечення даних видів підприємств як нового наукового напрямку. Синергія моделей дозволила розширити використання методів формалізації в поєднанні з напрямками статистичного моделювання, оцінювання стану електроенергетичних залізрудних підприємств із урахуванням відтворення потенціалу електроенергоресурсів залізрудного підприємства. Задля здійснення діагностики, прогнозування стратегічного розвитку та керування розподілом рівнів електроенергопотоків, в тому числі для споживачів з напругою живлення до 1000 В підземних залізрудних підприємств,

сформовано відповідний аналітичний інструментарій. Розроблено алгоритм керування рівнями споживання електричної енергії приймачами дільничних підземних підстанцій, котрий базується на принципі регулювання в годинах доби. Реалізовано постановку та означено варіант рішення задачі оптимізації споживання електроенергії в умовах змінності її тарифної вартості шляхом застосування методів математичного моделювання. Особливістю вирішення оптимізаційної задачі є те, що залежність вартості електроенергії від часу задається у вигляді кусково-постійної функції.

7. Розроблена методика оцінювання та математичного моделювання дозволяє реалізувати як короткочасне, так і довгострокове прогнозування рівнів споживання електричної енергії з достатнім рівнем достовірності. Перевагами запропонованої методики є можливість визначення показників як за окремими, з напругою живлення до 1000 В, видами приймачів електроенергії, так і підприємства взагалі та рівні сплати за неї згідно змінних погодинних тарифів. Це дасть можливість в умовах невизначеності та неповноти вхідної інформації оцінювати сегмент електроенерговитрат собівартості видобутку залізної руди.

8. Розроблена методологія, яка пропонується до втілення в формат технології розбудови та функціонування системи керування режимами споживання електроенергії приймачами дільничними підземними підстанціями залізрудних шахт, як складових в управлінських діях загальним процесом електроспоживання гірничим підприємством.

9. На базі генетичного алгоритму розроблено систему автоматизованого керування споживанням електричної енергії підземними приймачами залізрудних шахт із напругою живлення до 1000 В. Проаналізовано якість її роботи. Встановлено, що найнижчі витрати на електроенергію забезпечуються при застосуванні популяції зі 100 фенотипів, при чому із них 10 елітних та схрещуванні Лапласа. Такий варіант забезпечив значення оптимізуємої функції 41454,99 грн/добу, яке досягається за 181 покоління еволюції.

10. Втілення наукових розробок, які викладені в дисертаційній роботі, заданими спеціалізованих підприємств із розробки і впровадження систем електропостачання в практику роботи підземних гірничорудних підприємств дозволить отримати економічний ефект, а втілення їх в процес підготовки фахівців – здобувачів 1-го, 2-го та 3-го рівнів отримання вищої освіти дозволить підвищити якість підготовки останніх. Це підтверджується відповідними актами впровадження (Додаток Є).

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Єрмілов С. Ф. Енергетична стратегія України на період до 2030 року: проблемні питання змісту та реалізації (Енергозбереження, енергоефективність в Україні). *Енергоінформ*. 2006. № 48. С. 3–4.
2. Сердюк Т. В., Франишина С. Ю. Особливості реалізації політики енергозбереження в Україні: досягнення та шляхи вдосконалення. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2009. № 1. С. 52–56.
3. Жовтянський В. А., Кулик М. М., Стогній Б. С. (ред.). Стратегія енергозбереження в Україні: аналітико-довідкові матеріали: у 2 т. Механізм політики енергозбереження. Київ: Академперіодика, 2006. 600 с.
4. Шидловський А. К., Півняк Г. Г., Рогоза М. В., Випанасенко С. І. Геоелектроніка та геополітика України: навч. посібн. Дніпро: Національний гірничий університет, 2002. 282 с.
5. Вілкул Ю. Г., Азарян А. А., Колосов В. А. Сучасний стан гірничовидобувної промисловості України. *Гірничий вісник*. 2022. Вип. 110. С. 3–9.
6. Нагорна В.В., Булах О.В. Пошук ефективних методів переробки залізних руд Кривбасу з врахуванням їх властивостей. *Розвиток промисловості та суспільства: матеріали міжнародної науково-технічної конференції (24-26 травня 2023 р.)*. Криворізький національний університет. Кривий Ріг, 2023. С. 25.
7. Ступник М.І., Федько М.Б., Письменний С.В., Колосов В.О., Курносів С.А., Маланчук З.Р. Проблеми розкриття та підготовки рудних родовищ на швидкоплинних горизонтах шахт Кривбасу. *Вісник Криворізького національного університету*. 2018. Вип. 47. С. 3–8.
8. Малахов Г.И., Мартынов В.К., Фаустов Г.Г., Крузвенко И.А. Основные расчеты систем разработки рудных месторождений. М.: Недра, 1968, 275 с.
9. Сінчук І. О. Оцінювання конкурентного статусу енергоефективності підприємств гірничовидобувної промисловості. *International research and practice conference “Modern Methods, Innovations,*

and Experience of Practical Application in the Field of Technical Sciences”.
Радом, 2017. С. 103–106.

10. Sinchuk I. Introduction to the Formation of the Basic Structure of the Algorithm for the Control of Electric Energy Flows in Iron Ore Mines. *2019 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*. Kremenchuk, 2019. Pp. 266–269. DOI: <https://doi.org/10.1109/MEES.2019.8896426>

11. Sinchuk I. Harmonization of modeling systems for assessing the electric-power consumption levels at mining enterprises // *Mining of Mineral Deposits*. 2018. Vol. 12, No. 4. Pp. 100–107. DOI: <https://doi.org/10.15407/mining12.04.100>

12. Синчук І.О., Гузов Э.С., Яловая А.Н. Потенциал електроенергоефективності і пути його реалізації на производствах с подземними способами добычи железнорудного сырья: монографія. Кременчук: ПП Щербатих О.В., 2015.

13. Sinchuk O.M., Mykhailenko O.Yu., Kobeliatskyi D.V. A heuristic system for controlling the levels of electricity in the conditions of mining enterprises with underground methods of iron ore mining: monograph. Warsaw: iScience Sp z.o.o. 2024. 77 p. ISBN 978-83-66216-99-0

14. Sinchuk O.M., Rogoza M.V., Mykhailenko O.Yu., Kobeliatskyi D.V., Fedotov, V.O. Heuristic control of power consumption by up to 1000 V electrical loads at mining enterprises. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2024. Vol. 1. Pp. 84–92. DOI: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2024-1/084>

15. Sinchuk O.M., Mykhailenko O. Yu, Kobeliatskyi D.V., Strzelecki R. Simulation of power consumption control of receivers at underground iron ore mining enterprises. *Applied Aspects of Information Technology*. 2023. Vol. 6, No 4. Pp. 404–417. DOI: <https://doi.org/10.15276/aait.06.2023.27>

16. Михайленко О.Ю., Сінчук І.О., Котякова М.Г., Федотов В.О. Модель динамічного відновлювача напруги для аналізу роботи системи оперативної стабілізації напруги в електромережах підземних рудників.

Енергозбереження, енергетика, енергоаудит. 2025. Вип. 4 (207). С. 6-22.

DOI: <https://doi.org/10.20998/2313-8890.2025.04.01>

17. Beridze T., Mykhailenko O., Sinchuk I., Kotiakova M., Rogoza M., Jamiński M. The Multifactorial Approach to Power Quality Analysis in Underground Mining. *Inżynieria Mineralna*. 2025. Vol. 1, No 1. Pp. 133-145.

DOI: <https://doi.org/10.29227/im-2025-01-19>

18. Синчук И.О., Антоненко А.О. Особенности организации мероприятий по повышению качества электроэнергии на железнорудных шахтах. *Гірничий вісник*. 2014. Вип. 97. С. 149–152.

19. Сінчук І.О. та ін. Аспекти теорії та практики оцінки електроенергетичної конкурентоспроможності залізнорудних підприємств. Звіт з науково – дослідної роботи (заключний). НР/П-84-18. Кривий Ріг, 2020. 144 с. РК№0118U006520.

20. Сінчук О.М. та ін. Інтеграція розумних технологій побудови електроенергетичних систем у контексті підприємств гірничо – металургійної галузі. Звіт за період виконання науково – дослідної роботи з 01.06.2021 р. по 31.12.2021 р. (згідно з договором №30-114-21) (проміжковий). Кривий Ріг, 2021. 165 с. РК№0121U111709.

21. Сінчук О.М. та ін. Розроблення комплексу заходів по енергозбереженню на підприємствах залізнорудної промисловості. Звіт з науково – дослідної роботи №30-98-14 (заключний). Кривий Ріг, 2015. 275 с. РК№0114U003457.

22. Sinchuk O. N., Kobeliatskyi D. V. Modeling assessment of power consumption efficiency at iron ore mining enterprises. *Applied Aspects of Information Technology*. 2023. Vol. 6, No 1. Pp. 43–51. DOI: <https://doi.org/10.15276/aait.06.2023.3>

23. Sinchuk O., Strzelecki R., Beridze T., Peresunko I., Baranovskyi V., Kobeliatskyi D., Zapalskyi V. Model studies to identify input parameters of an algorithm controlling electric supply/consumption process by underground iron ore

enterprises. *Mining of Mineral Deposits*. 2023. Vol. 17, No. 3. P. 93–101. DOI: <https://doi.org/10.33271/mining17.03.093>

24. Mykhailenko O., Baranovskyi V., Shchokin V., Karabut N., Kolomits H. Power consumption control of multi-pump systems of the main water drainage in underground mines based on the Mamdani fuzzy inference system. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2023. Vol. 1254. Article 012046. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1254/1/012046>

25. Sinchuk I., Kupin A., Budnikov K., Baranovska M. Preventive theses to options for developing smart control systems for power flows distribution among consumers of iron ore underground mines: monograph. Warsaw: iScience Sp. z o.o., 2023. 92 p.

26. Baranovskyi V. Starting positions to improve energy efficiency of main water drainage facilities of iron ore underground mines: monograph / Edited by Dr. Sc. (Tech.), Prof. Sinchuk O. Warsaw: iScience Sp. z o.o., 2023. 135 p.

27. Sinchuk I., Budnikov K., Krasnopol'sky R. Fundamentals of integrating smart technologies for controlling power systems at iron ore underground mining enterprises: monograph. Warsaw: iScience Sp. z o.o., 2021. 123 p.

28. Dozorenko O., Peresunko I., Mykhailenko O., Fedotov V., Pyrozhenko A. Operating modes of mining enterprises. Condition, problems: monograph. Warsaw: iScience Sp. z o.o., 2023. 114 p.

29. Кобеляцький Д. В. Маневрове керування режимами споживання електроенергії приймачами шахтних дільничих підземних підстанцій. *Розвиток промисловості та суспільства: матеріали міжнародної науково-технічної конференції (23-24 травня 2024 р.)*. Криворізький національний університет. Кривий Ріг, 2024. С. 90.

30. Сінчук О.М., Сьомочкін А.Б., Барановська М.Л., Кобеляцький Д.В. До проблеми покращення якості електричної енергії у внутрішньошахтних електричних мережах шляхом їх переводу на підвищені рівні напруги. *Розвиток промисловості та суспільства: матеріали*

міжнародної науково-технічної конференції (24-26 травня 2023 р.). Криворізький національний університет. Кривий Ріг, 2023. С. 56.

31. Сінчук О. М., Кобеляцький Д. В. Стохастичність в моделюванні системи постачання-споживання електричної енергії. *Розвиток промисловості та суспільства: матеріали міжнародної науково-технічної конференції (24-26 травня 2023 р.)*. Криворізький національний університет. Кривий Ріг, 2023. С. 63.

32. Сінчук О. М., Сінчук І. О., Осадчук Ю. Г., Касаткіна І. В. До проблеми побудови тактики реалізації процесу модернізації систем електропостачання діючих залізрудних шахт. *Якість мінерального сировини*. 2018. С. 623–633.

33. Якимець С., Ходаковський М., Олійніченко М., Чорна В. Оцінка потенціалу джерел відновлюваної енергетики в умовах залізрудних підприємств. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: технічні науки*. 2025. № 50. С. 140–153. <https://doi.org/10.31498/2225-6733.50.2025.336322>

34. Синчук О.Н., Синчук И.О., Дяченко В.С., Бойко С.Н., Минаков М.Н. Особенности выбора возобновляемых источников энергии в состав системы электроснабжения предприятий горно-добывающего комплекса. *XII International Scientific and Practical Conference «Prospects of World Science – 2016»*. Шеффилд, 2016. № 3. С. 64–67.

35. Сінчук І.О. Методологічні засади оцінювання електроенергоефективності залізрудних підприємств: монографія. Кременчук: ПП Щербатих О.В., 2019.

36. Колосов В.А. Повышение качества железорудной промышленности и показателей работы шахт на основе совершенствования технологии добычи и переработки, дис. докт. техн. наук, КТУ, Кривой Рог, Украина, 2002.

37. Папаїка Ю.А. Енергетична ефективність систем електропостачання гірничих підприємств з нелінійними навантаженнями.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.09.03 «Електротехнічні комплекси та системи», 2019, Дніпровська політехніка. 320 с.

38. Капленко Ю., Янов Е. Влияние глубины горных работ на технико – экономические показатели подземной добычи руды. Вісник Криворізького технічного університету. 2006. №5(15). С. 25–28.

39. Sinchuk O., Strzelecki R., Sinchuk I., Beridze T., Fedotov V., Baranovskyi V., Budnikov K. Mathematical model to assess energy consumption using water inflow-drainage system of iron-ore mines in terms of a stochastic. Mining of Mineral Deposits. 2022. Vol. 16, No 4. 2022, pp. 19-28, <https://doi.org/10.33271/mining16.04.019>

40. Сінчук О.М., Берідзе Т.М., Кобеляцький Д.В. Математичні прогнозні моделі в парадигмі формування системи постачання – споживання – виробництво. *Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції «Розвиток промисловості та суспільства»*, Кривий Ріг, 2023, 68 с.

41. Довгий С.О., Трофимчук О.М., Коржнев М.М., Яковлев Є.О. та ін. Стратегічні напрями реструктуризації Донецького вугільного і Криворізького залізорудного басейнів в умовах трансформацій енергетичної сфери. К.: Ніка-Центр, 2019. 144 с. ISBN 978-966-7067-35-9

42. Довгий С.О., Іванченко В.В., Коржнев М.М., Трофимчук О.М., Яковлев Є.О. та ін. Дослідження екологічного стану території пост-майнінгу в Україні на прикладі Криворізького басейну та його оточення. К.: Ніка-Центр, 2021. 196 с. ISBN 978-966-521-761-3

43. Сінчук І. О. Вартісно-цільові аспекти моніторингу рівнів електроспоживання на підприємствах залізорудної галузі Криворізького регіону. *Електротехніка та електроенергетика*. 2018. № 3. С. 30–38.

44. Лейбов Р.М., Озерной М.И. Электрификация подземных горных работ, М., Недра, 1972.

45. Озерной М.И. Электробоорудование и электроснабжение подземных разработок угольных шахт. М.: Недра, 1975.

46. Волощенко Н.И., Островский Э.П., Дикий Ю.А. Системы внешнего электроснабжения шахт. М.: ЦНИЭИуголь, 1976.
47. Гладилин Л.В. Основы электроснабжения горных предприятий. М.:Недра, 1980.
48. Колосюк В.П. Защитное отключение рудничных элеткроустановок. М.:Недра, 1980.
49. Винославский В.Н., Праховник А.В., Клеппель Ф., Бутц У. Проектирование систем электроснабжения: Учебное пособие для вузов. Киев: Вища школа, 1981.
50. Волотковский С.А., Разумный Ю.Т., Пивняк Г.Г. и др. Электроснабжение угольных шахт. М.: Недра, 1984.
51. Моркун В.С., Тонкошкур Л.С., Гарковенко Є.Є. Електропостачання і електроустаткування гірничих підприємств. Навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів. Кривий Ріг: Мінерал, 2005. 269 с.
52. Шуцкий В.И., Волощенко Н.И., Плащанский Л.А. Электрификация подземных горных работ: учеб. для вузов. М.: Недра, 1986.
53. Озерной М.И. Электрооборудование и электроснабжение подземных разработок угольных шахт. М.:Недра, 1975.
54. Шкрабець Ф.П., Плешков П.Г. Основи електропостачання. Навчальний посібник. Кіровоград: РВЛ КНТУ, 2010. 408 с.
55. Электрификация горных работ: Учебник для вузов / Под редакцией Волотковского С.А. К.: Вища школа., 1980. 448 с.
56. Електрифікація гірничого виробництва: Підручник для ВНЗ: у 2-х / За ред. Пучкова Л.О. і Півняка Г.Г.. Вид. 2-ге вид. перероб. та допов. Т.1. Дніпропетровськ: Національний гірничий університет, 2010, 503 с.
57. Электрооборудование и электроснабжение горнорудных предприятий / Под ред. Виноградова В.С. М.: Недра, 1983.
58. Авилов-Карнаухов Б.Н. Электроэнергетические расчеты для угольных шахт. М.: Недра, 1969, 96 с.

59. Авилов – Карнаухов Б.Н. Электроэнергетические расчеты для угольных шахт. М.: Недра, 1956.
60. Авилов-Карнаухов Б.Н. Нормирование электроэнергии для угольных шахт. М.: Недра, 1958.
61. Разгильдеев Г.И. Классификация потребителей шахт по надежности электроснабжения. *Известия ВУЗов. Горный журнал*. 1972. №7. С. 27–31.
62. Турышев Б.Ф. Выбор силовых трансформаторов для рудничных подстанций. *Известия ВУЗов. Горный журнал*. 1958, №1. С. 33–38.
63. Ляхомский А.В. Математическое моделирование электропотребления горных предприятий. *Известия ВУЗов. Электромеханика*. №12. 1986. С. 15–17.
64. Праховник А.В., Розен В.П., Дегтярев В.В. Энергозберигающие режимы электроснабжения горнодобывающих предприятий. М.: Недра, 1985, 232 с.
65. Разумный Ю.Т., Шкрабец Ф.П. Повышение эффективности электроснабжения угольных шахт. К.: Техника, 1986. 135 с.
66. Дьяченко В.В. Повышение энергоеffectивности систем электроснабжения промышленных предприятий. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук, Кременчуг, 2012. 18 с.
67. Шидловский А.К., Вагин Г.Я., Куренный Э.Г. Расчеты электрических нагрузок систем электроснабжения промышленных предприятий. М.: Энергоатомиздат, 1992. 224 с.
68. Праховник А.В. Исследование электрических нагрузок и разработка экономически целесообразных графиков электропотребления ЦПП угольных шахт, 05.281 Электрификация горной промышленности. Дисс. на соиск. учен. степени к. т. н. К.: КПИ, 1971. 192 с.
69. Пащук В.Я. Исследование закономерностей формирования и определение електрических нагрузок потребителей угольных шахт, 05.09.03 –

Электрооборудование угольной промышленности. Дисс. на соиск. учен. степени к. т. н. К.: КПИ, 1974. 176 с.

70. Находов В.Ф. Нормирование и оценка эффективности электропотребления в промышленности (на примере угольных шахт). Дисс. на соиск. учен. степени, к. т. н. К.: КПИ, 1986. 175 с.

71. Розен В. П., Давиденко Л. В., Волинець В. І. Оцінювання енергоефективності електроспоживання вугільних шахт. *Матеріали IV міжнародної науково-технічної конференції «Підвищення рівня ефективності енергоспоживання в електротехнічних пристроях і системах»*, м. Луцьк (30 червня – 1 липня 2012). РВВ ЛДТУ. 2012. С. 130–132.

72. Мокін Б. І., Камінський А. В. Комп'ютерне моделювання процесу пошуку центру електричної мережі. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2003. № 2. С. 80–85.

73. Качан Ю. Г., Братковська К. О. Щодо оптимізації послідовності реалізації програм енергозбереження за економічним критерієм. *Вісник економічної України*. 2009. № 1. С. 97–100.

74. Папаїка Ю.А. Енергетична ефективність систем електропостачання гірничих підприємств з нелінійними навантаженнями. Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.09.03 «Електротехнічні комплекси та системи», 2019, Дніпровська політехніка. 320 с.

75. Заика В.Т. Качество напряжения и оптимизация параметров электрических сетей добычных участков угольных шахт, автореф. дис. канд. техн. наук, ДГИ, Днепропетровск, 1977.

76. Грейсух М.В. Основные вопросы проектирования электроснабжения горнорудных предприятий. *Горный журнал*. 1958. №4.

77. Полтава Л.И. Пути рационализации подземного электроснабжения железнорудных шахт Кривбасса. 1948. *Сборник научных трудов КГРИ*. 1948. №2. С. 3–10.

78. Живов Л.Г., Полтава Л.И. Определение мощности штрековых подстанций железнорудных шахт. *Горный журнал*. 1949. №6. С. 18–22.
79. Калиниченко В.Ф. Определение нагрузки на шинах главной подземной подстанции шахты. *Бюлетень НТИ*. 1980.
80. Тонкошкур Л.С. Определение расчетных электрических нагрузок на поверхности железнорудных шахт. *Горный журнал*. 1957. №7. С. 59–60.
81. Корнилов Г.И. К вопросу о рациональном типе схемы распределения электроэнергии на горизонтах глубоких железнорудных шахт, *Известия ВУЗов. Горный журнал*. 1967. №11. С. 18–21.
82. Маймин С.Р., Кутовой Л.Н., Тесленко В.И. Рациональная компенсация реактивной мощности в электрической сети шахт. М.: Недра, 1968.
83. Майнин С.Р., Мурзин В.А. Удельные нормы потребления электроэнергии на шахтах Кривбасса. *Горный журнал*. 1949. №7.
84. Бинус М.С., Мирошкин П.П. Новые виды электрооборудования в нормальном рудничном исполнении. М.: Недра, 1987.
85. Клименко Н.А. Повышение качества напряжения в системах электроснабжения шахт. М.: Недра, 1977, 159 с.
86. Рогов Е.И., Ершов Ю.И. Анализ и пути совершенствования схем электроснабжения горных предприятий. *Труды ИГД АН. Каз. ССР*. 1971. Т. 47. С. 85–88.
87. Светличный П.Л. Выбор и эксплуатация электрооборудования участка шахты. М.: Недра, 1980.
88. Самойлович И.С., Синчук О.Н., Панасенко К.В., Ксендзов В.В. Электроэнергетика карьеров с циклично-поточной технологией. Под редакцией Синчука О.Н.. К.: АДЕФ, Украина, 2000. 209 с.
89. Корнилов Г.И. Экономическая целесообразность резервирования схем электроснабжения промышленных предприятий. *Сборник научных трудов КГРИ*. 1964. №. 32.

90. Тонкошкур Л.С., Ликаренко А.Г. Самонастраивающийся аппарат защиты от утечки САЗУ-2. Электробезопасность от перегрузок горнорудной промышленности, Отчет по НИР. 1970. 250 с.

91. Щетка В.Ф. Разработка и внедрение высокоэффективных систем электроснабжения шахт с переходом на большие глубины в условиях интенсификации горных работ, увеличения единичных мощностей и использования тиристорных преобразователей. Кривой Рог. 1981.

92. Kotiakova M.G. Aspects of development of modern management systems for improving the quality of electric energy in distribution networks of iron ore enterprises : monograph / Edited by associate professor I.O. Sinchuk. Warsaw: iScience Sp. z.o.o. 2023. 61 p.

93. Щетка В.Ф. Разработать и выдать рекомендации по созданию рациональных схем электроснабжения и электрооборудования для перевода железнорудных шахт на повышенное напряжение 660-1000 В. Отчет НИР. Кривой Рог, 1983. 82 с.

94. Сінчук О.М., Гузов Є.С., Пархоменко Р.О. Свідोцтво про реєстрацію авторського права на твір №48953 Совершенствование методов расчета электрических нагрузок промышленных предприятий, 26.04.2013.

95. Яловая А.Н. Электроэнергоеффективность и методы повышения при подземном способе добычи железнорудного сырья, дисс. на соиск. уч. степени к. т. н., Кривой Рог, 2015.

96. Синчук О.Н., Синчук И.О., Гузов Э.С., Пархоменко Р.А. Повышение эффективности функционирования подземных участковых подстанций. *Наук. пр. ДонНТУ. Серія «Електротехніка і енергетика»*. 2013. №1(14). С. 256 – 260.

97. Сінчук І.О., Бойко С.М., Щербак М.А. Обґрунтування можливості використання вітрового генератора з вертикальною віссю в умовах шахт, на Х Міжнародна науково-технічна конференція молодих учених і спеціалістів. «Електротехнічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації». Кременчук, КрНУ. 2012. С. 326–328.

98. Sinchuk I.O., Kotiakova M.G. Preface to the development of rapid response systems to deviations of electricity quality indicators from standard values in internal mine electric networks : monograph / Edited by Professor Sinchuk O.M. Warshaw: iScience Sp. z.o.o., 2025. 85 p.

99. Сінчук О.М., Сінчук І.О., Бойко С.М. Теоретичні аспекти використання автономних вітроенергетичних установок в підземних гірничих виробках залізрудних шахт. *Вісник Криворізького національного університету*. 2014. Вип. 36. С. 153–157.

100. Сінчук О.М., Бойко С.М., Бауліна М.А. Електротехнічний комплекс вітроенергетичної установки для експлуатації в умовах підземних гірничих виробок залізрудних шахт. *Качество минерального сырья*. 2014. С. 92–97.

101. Сінчук І.О., Богодист К.П., Ялова А.М., Бауліна М.А. До реалій розбудови служби енергоменеджменту гірничорудного комбінату *Вісник Криворізького національного університету*. 2014. Вип. 36. С. 241–246.

102. Берідзе Т.М., Касаткіна І.В., Бойко С.М. Дослідження критеріїв оцінювання якісних показників електропостачання промислових підприємств. *Вісник Криворізького національного університету*. 2023. Вип.. 57, С. 121–127. DOI: <https://doi.org/10.31721/2306-5451-2023-1-57-121-127>

103. Випанасенко С. Системи енергоменеджменту вугільних шахт: монографія, Дніпропетровськ: Національний гірничий університет, 2008. 106 с.

104. Плешков П.Г., Серебреніков С.В., Сіріков О.І., Савенко І.В. Енергетичний інжиніринг та менеджмент: в 3-х ч. Ч.1 Проектування ефективних енергетичних систем. Кропивницький: ЦНТУ, 2018. 156 с.

105. Жаркин А.Ф., Денисюк С.П., Попов В.А. Системы электроснабжения с источниками распределенной генерации. К.: Наукова думка, 2017, 231 с.

106. Моркун В.С., Тонкошкур Л.С., Гарковенко Е.Е. Електроустаткування і електропостачання гірничих підприємств. Кривий Ріг: Мінерал, 2005. 269 с.
107. Albogamy F. R. et al. Optimal demand-side management using flat pricing scheme in smart grid. *Process*. 2022. Vol. 10, No. 6, Art. 6. DOI: <https://doi.org/10.3339/pr10061214>
108. Alwan H. O., Abdelwashed S. Demand side management – literature review and performance comparison. *2019 11th International Conference on Computation Intelligence and Communication Networks (CICN)*. Jan. 2019. Pp. 93–102. DOI: <https://doi.org/10.1109/CICN.2019.8902364>
109. Assad U. et al. Smart grid, demand response and optimization: a critical review of computational methods. *Energies*. 2022. Vol. 15, No. 6, Art. 6. DOI: <https://doi.org/10.33390/en15062003>
110. Babu P. R., Divya V. P., Venkatesh K., Koded S. F., Ram B. V. S. Application of ANN and DSM techniques for peak load management: a case study. *2008 IEEE Region 8 International Conference on Computational Technologies in Electrical and Electronics Engineering*. Jul. 2008. Pp. 169–174. DOI: <https://doi.org/10.1109/SIBIRCON.2008.4602568>
111. Bastani M., Damgacioglu H., Celik N. A δ -constraint multi-objective optimization framework for operation planning of smart grids. *Sustainable Cities and Society*. 2018. Vol. 38. Pp. 21–30. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.12.006>
112. Bhattacharyya K., Crow M. L. A fuzzy logic based approach to direct load control. *IEEE Transactions on Power Systems*. 1996. Vol. 11, No. 2. Pp. 708–714. DOI: <https://doi.org/10.1109/59.496143>
113. Chandan C. V., Basu M., Sunderland K. Comparative study between direct load control and fuzzy logic control based demand response. *Conference papers*. Jan. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1109/UPEC.2016.8114090>
114. Deep K., Singh K. P., Kansal M. L., Mohan C. A real coded genetic algorithm for solving integer and mixed integer optimization problems // *Applied*

Mathematics and Computation. 2009. Vol. 212, No. 2. Pp. 505–518. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.amc.2009.02.044>

115. Foster J. D., Berry A. M., Boland N., Waterer H. Comparison of mixed-integer programming and genetic algorithm methods for distributed generation planning. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2014. Vol. 29, No. 2. Pp. 833–843. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2013.2287880>

116. Guller E., Filik U. B. Optimal residential load control comparison using linear programming and simulated annealing for energy scheduling. *Eskisehir Technical University Journal of Science and Technology A – Applied Sciences and Engineering*. 2020. Vol. 21, No. 1. DOI: <https://doi.org/10.18038/estubtda.648767>

117. Hasanpor Divshali P., Choi B. J., Liang H., Söder L. Transactive demand-side management programs in smart grids with high penetration of EVs. *Energies*. 2017. Vol. 10, No. 10, Art. 1640. DOI: <https://doi.org/10.3390/en10101640>

118. Iqbal S. et al. A comprehensive review on residential demand-side management strategies in smart grid environment. *Sustainability*. 2021. Vol. 13, No. 13, Art. 7170. DOI: <https://doi.org/10.3390/su13137170>

119. Jasim A. M., Jasim B. H., Neagu B.-C., Alhasnawi B. N. Efficient optimization algorithm-based demand-side management program for smart grid residential load. *Axioms*. 2023. Vol. 12, No. 1, Art. 33. DOI: <https://doi.org/10.3390/axioms12010033>

120. Javaid N. et al. A hybrid genetic wind driven heuristic optimization algorithm for demand-side management in smart grid. *Energies*. 2017. Vol. 10, No. 3, Art. 3. DOI: <https://doi.org/10.3390/en10030319>

121. Keshtkar A., Arzanpour S. A fuzzy logic system for demand-side load management in residential buildings. *2014 IEEE 27th Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE)*. May 2014. Pp. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.1109/CCECE.2014.6900956>

122. Khan Z. A., Khalid A., Javaid N., Haseeb A., Saba T., Shafiq M. Exploiting nature-inspired-based artificial intelligence techniques for coordinated

day-ahead scheduling to efficiently manage energy in smart grid. *IEEE Access*. 2019. Vol. 7. Pp. 140102–140125. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2942813>

123. Logenthiran T., Srinivasan D., Shun T. Z. Multi-agent system for demand-side management in smart grid. *2011 IEEE Ninth International Conference on Power Electronics and Drive Systems*. Dec. 2011. Pp. 424–429. DOI: <https://doi.org/10.1109/PEDS.2011.6147283>

124. Logenthiran T., Srinivasan D., Shun T. Z. Demand-side management in smart grid using heuristic optimization. *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2012. Vol. 3, No. 3. Pp. 1244–1252. DOI: <https://doi.org/10.1109/TSG.2012.2195686>

125. Matallanas E. et al. Neural network controller for active demand-side management with PV energy in the residential sector. *Applied Energy*. 2012. Vol. 91, No. 1. Pp. 90–97. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.09.004>

126. Menos-Aikateriniadis C., Lamprinos I., Georgilakis P. S. Particle swarm optimization in residential demand-side management: a review on scheduling and control algorithms for demand response provision. *Energies*. 2022. Vol. 15, No. 6. 2211. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15062211>

127. Nayak S. K., Sahoo N. C., Panda G. Demand side management of residential loads in a smart grid using 2D particle swarm optimization technique. *2015 IEEE Power, Communication and Information Technology Conference (PCITC)*. Oct. 2015. Pp. 201–206. DOI: <https://doi.org/10.1109/PCITC.2015.7438160>

128. Nethravathi S., Murali V. A novel residential energy management system based on sequential whale optimization algorithm and fuzzy logic. *Distributed Generation & Alternative Energy Journal*. 2022. Pp. 557–586. DOI: <https://doi.org/10.13052/dgaej2156-3306.3739>

129. Niharika, Mukherjee V. Day-ahead demand side management using symbiotic organisms search algorithm. *IET Generation, Transmission & Distribution*. 2018. Vol. 12, No. 14. Pp. 3487–3494. DOI: <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2018.0106>

130. Philipo G. H., Chande Jande Y. A., Kivevele T. Clustering and fuzzy logic-based demand-side management for solar microgrid operation: case study of Ngurudoto microgrid, Arusha, Tanzania. *Advances in Fuzzy Systems*. 2021. Vol. 2021. Art. e6614129. DOI: <https://doi.org/10.1155/2021/6614129>
131. Philipo G. H., Kakande J. N., Krauter S. Neural network-based demand-side management in a stand-alone solar PV–battery microgrid using load-shifting and peak-clipping. *Energies*. 2022. Vol. 15, No. 14, Art. 5215. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15145215>
132. Poniris S., Dounis A. I. Electric vehicle charging schedules in workplace parking lots based on evolutionary optimization algorithm. *Energies*. 2023. Vol. 16, No. 1. Art. 221. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16010221>
133. Ponocko J., Milanovic J. V. Multi-objective demand side management at distribution network level in support of transmission network operation. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2020. Vol. 35, No. 3. Pp. 1822–1833. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2019.2944747>
134. Rajaeswari R., Modi A. K. V. Demand side management in smart grid using optimization technique for residential, commercial and industrial load. *Indian Journal of Science and Technology*. 2016. Vol. 9, No. 43. Pp. 1–7. DOI: <https://doi.org/10.17485/ijst/2016/v9i43/101858>
135. Ramezani M., Bahmanyar D., Razmjooy N. A new optimal energy management strategy based on improved multi-objective antlion optimization algorithm: applications in smart home. *SN Applied Sciences*. 2020. Vol. 2, No. 12. Pp. 2075. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42452-020-03885-7>
136. Rezaei N., Ahmadi A., Deihimi M. A comprehensive review of demand-side management based on analysis of productivity: techniques and applications. *Energies*. 2022. Vol. 15, No. 20, Art. 7614. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15207614>
137. Salami A., Farsi M. M. Demand side management using direct load control for residential and industrial areas. *2015 International Congress on*

Electric Industry Automation (ICEIA 2015). Feb. 2015. Pp. 11–16. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICEIA.2015.7165839>

138. Shah A. S., Nasir H., Fayaz M., Lajis A., Shah A. A review on energy consumption optimization techniques in IoT-based smart building environments. *Information*. 2019. Vol. 10, No. 3, Art. 108. DOI: <https://doi.org/10.3390/info10030108>

139. Shah Z. A., Sindi H. F., Ul-Haq A., Ali M. A. Fuzzy logic-based direct load control scheme for air conditioning load to reduce energy consumption. *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. Pp. 117413–117427. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3005054>

140. Sivanandam S. N., Deepa S. N. Introduction to genetic algorithms. Berlin; New York: Springer, 2007.

141. Tamilarasu K., Sathiasamuel C. R., Joseph J. D. N., Elavarasan R. M., Mihet-Popa L. Reinforced demand-side management for educational institution with incorporation of user's comfort. *Energies*. 2021. Vol. 14, No. 10, Art. 2855. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14102855>

142. Ulah K. et al. Demand side management strategy for multi-objective day-ahead scheduling considering wind energy in smart grid. *Energies*. 2022. Vol. 15, No. 19, Art. 6900. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15196900>

143. Usman R., Mirzania P., Alnaser S. W., Hart P., Long C. Systematic review of demand-side management strategies in power systems of developed and developing countries. *Energies*. 2022. Vol. 15, No. 21, Art. 7858. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15217858>

144. Wang K., Li H., Maharjan S., Zhang Y., Gue S. Green energy scheduling for demand side management in the smart grid. *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*. 2018. Vol. 2, No. 2. Pp. 596–611. DOI: <https://doi.org/10.1109/TGCN.2018.2797533>

145. Yu L., Yue L., Zhou X., Hou C. Demand side management pricing method based on LSTM and A3C in cloud environment. *2022 4th International*

- Conference on Power and Energy Technology (ICPET)*. Jul. 2022. Pp. 905–909. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICPET55165.2022.9918275>
146. Берідзе Т., Сінчук І., Федотов В., Котякова М. та Шепелев К. Засадничі імперативи моделювання якості електричної енергії. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences*. 2025. Т. 349, № 2. С. 45-50. DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-349-6>
147. Sinchuk I., Mykhailenko O., Kupin A., Ilchenko O., Budnikov K., Baranovskyi V. Developing the algorithm for the smart control system of distributed power generation of water drainage complexes at iron ore underground mines. *2022 IEEE 8th International Conference on Energy Smart Systems (ESS)*. 2022. Pp. 116–122. DOI: <https://doi.org/10.1109/ESS57819.2022.9969263>
148. Сінчук І., Котякова М. Контроль якості електричної енергії в аспекті впровадження технології Micro Grid. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2023. Т. 34(73), № 2. С. 288-292. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.2.1/45>
149. Сінчук І., Котякова М. Підхід до покращення якісних показників електроенергії залізничних підприємств. *Вісник Криворізького національного університету*. 2023. Вип. 57. С. 43-52. DOI: <https://doi.org/10.31721/2306-5451-2023-1-57-43-52>
150. Жежеленко І.В., Саравас В.Є. Визначення індексу надійності систем електропостачання. *Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті*. 2017. №13. С. 31–34. DOI: <https://doi.org/10.15802/ecsr2017/136814>
151. Півняк Г.Г., Жежеленко І.В., Папаїка Ю.А. Енергетична ефективність систем електропостачання: монографія. 2-ге вид. перероб. і доп. Дніпро: НТУ «Дніпровська політехніка», 2018. 147 с.
152. Жежеленко І.В., Нестерович В.В. Аналіз методів оцінки плати за перетікання реактивної енергії в мережах промислових підприємств. *Вісник Приазовського державного технічного університету*. 2015. Вип. 31. С. 174–180.

153. Sinchuk O., Mykhailenko O., Sinchuk I., Kotiakova M., Baranovskyi V., Baranovska M. Adaptive control of power receivers supply voltage in underground mines. *Mining of mineral deposits*. 2025. Vol. 19, No 4. Pp. 119–129. <https://doi.org/10.33271/mining19.04.119>
154. Огірко О.І., Галайко Н.В. Теорія ймовірностей та математична статистика: навч. посіб. Львів: ЛьвДУВС, 2017. 292 с.
155. Єременко В.С., Куц Ю.В., Мокійчук В.М., Самойліченко О.В. Статистичний аналіз даних вимірювань: навч. посіб. К.: НАУ, 2013. 320 с.
156. Chapra S.C., Canale R.P. Numerical methods for engineers. 6th ed. New York: McGraw-Hill, 2010. ISBN 978-0-07-340106-5
157. Жильцов О.Б. Теорія ймовірностей та математична статистика у прикладах і задачах: навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл. / За ред. Михайліна Г.О. К.: Київський столичний університет імені Бориса Грінченка, 2015. 336 с.
158. Бокс Дж., Дженкинс Г. М. Анализ временных рядов. Прогноз и управление. Вып. 1 / Пер. с англ. Левшина А.А.. Мир, 1974. 406 с.
159. Основи теорії подібності та аналізу розмірностей та їх застосування в задачах механіки: навч. посіб. / Упорядники: Кепич Т.Ю., Куценко О.Г. К.: КНУ ім. Тараса Шевченка, 2004. 101 с.
160. Підгорний А.З. Теорія статистики: навч. посіб. Одеса: ОДЕУ, 2001. 140 с.
161. Bjork A. Numerical methods for least squares problems. Philadelphia: SIAM, 1996. ISBN 0-89871-360-9.
162. Rouaud M. Probability, statistics and estimation. Propagation of Uncertainties in Experimental Measurement. Boudiguen, 2013. 253 p.
163. Kendall M. G., Stuart A. The advanced theory of statistics. Vol. 2. 3rd ed. London: Griffin, 1973. Section 27.22. ISBN 0-85264-215-6
164. Єгоршин О.О., Малярець Л.М. Математичне програмування, Ч.: ВД «ІНЖЕК», 2006, 384 с.

165. Бокало Б.М. Навчально-методичний посібник з аналітичної геометрії. Львів: Видавничий центр ЛНУ ім. І. Франка, 2008. 262 с.
166. Щелкунов В.І., Сінчук О.М., Берідзе Т.М., Кононенко В.В. Теорія випадкових процесів та її використання в економічних дослідженнях: за ред. О.М. Сінчука. К.: Наукова думка, 2004. 115 с.
167. Сінчук О.М., Козакевич І.А., Філіпп Ю.Б., Осадчук Ю.Г. Основи теорії надійності: навч. посіб. Кривий Ріг: ПП Щербатих О.В., 2019. 98 с.
168. Закон України «Про ринок електричної енергії». Верховна Рада України. Законодавство України: веб-сайт. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2019-19#Text> (дата звернення: 23.11.2022).
169. Суходоля О.М. Штучний інтелект в енергетиці: аналіт. доповідь К.: НІСД, 2022/ 49 с. <https://doi.org/10.53679/NISS-analytrep.2022.09>
170. Аналіз РДН та ВДР. АЦСК ринку електричної енергії: веб – сайт. URL: https://www.oree.com.ua/index.php/IDM_graphs (дата звернення: 06.03.2023).
171. Immanuel S. D., Chakraborty U. Kr. Genetic Algorithm: An Approach on Optimization. *2019 International Conference on Communication and Electronics Systems (ICCES)*. 2019. Pp. 701-708. <https://doi.org/10.1109/ICCES45898.2019.9002372>
172. Про утворення Координаційного центру із забезпечення запровадження нового ринку електричної енергії : Постанова Кабінету Міністрів України від 09.08.2017 № 559. Верховна Рада України. Законодавство України: веб-сайт. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/559-2017-%D0%BF#Text> (дата звернення: 27.03.2025)
173. Powell J., McCafferty-Leroux A., Hilal W., Gadsden S.A. Smart grids: A comprehensive survey of challenges, industry applications, and future trends. *Energy Reports*. 2024. Vol. 11. Pp. 5760–5785. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2024.05.051>

174. Випадкові процеси: теорія, статистика, застосування : підручник / Ю. С. Мішура, К. В. Ральченко, Л. М. Сахно, Г. М. Шевченко. 2-ге вид., випр. і допов. К.: ВПЦ «Київський університет», 2023. 496 с.
175. Єріна А. М. Статистичне моделювання та прогнозування: навч. посібник. К.: КНЕУ, 2001. 170 с.
176. Бідюк П. І., Гожий О. П. Ймовірісно-статистичні методи моделювання і прогнозування: монографія. Миколаїв: Чорноморський державний університет ім. Петра Могили, 2014. 440 с.
177. Михайленко О.Ю., Сінчук І.О., Котякова М.Г. Оперативне керування рівнями напруги живлення систем електропостачання підземних рудників : монографія. Warsaw: iScience Sp. z.o.o. 2025. 99 с. ISBN 978-83-68188-22-6