

Міністерство освіти і науки України
Криворізький національний університет

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

КОТЯКОВА МАРИНА ГЕННАДІЇВНА



УДК 621.316.1:681.513.1

ДИСЕРТАЦІЯ

**ОПЕРАТИВНЕ КЕРУВАННЯ НАПРУГОЮ ЖИВЛЕННЯ
СПОЖИВАЧІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ ПІДЗЕМНИХ РУДНИКІВ**
Спеціальність 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
Галузь знань 14 – «Електрична інженерія»

Подається на здобуття ступеня доктора філософії

Науковий керівник:

Сінчук Ігор Олегович,
кандидат технічних наук, доцент

Кривий Ріг – 2026

АНОТАЦІЯ

Котякова М.Г. Оперативне керування напругою живлення споживачів електричних мереж підземних рудників. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

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.

Гірничо-металургійна промисловість являє собою базову галузь економіки України і, водночас є найбільшим споживачем електричної енергії серед інших промислових виробництв в Україні.

Підприємства вищенаведеної галузі промисловості традиційно відносяться до категорії енергоємних та енергозалежних виробництв, що обумовлене певним рівнем консерватизму технології їх функціонування.

Більше того, згідно з все ж тією технологією, складові вищезгаданого виду промислового комплексу – гірничорудні підприємства в числі яких рудники з підземними способами видобутку залізної руди, як базові складові металургійного виробництва, з часом їх функціонування креативно погіршують, в кінцевому своєму визначенні, показник енергоефективності даних видів виробництв.

Сформована в роботі «дорожня карта» наукового пошуку з аналізом процесів у внутрішньорудниковому комплексі: електропостачання – електроспоживання дозволила сформувати рейтинг показників якості електроенергії з визначенням найбільш впливових з них на якість функціонування вищенаведеного електроенергетичного комплексу в агрегативному варіанті його функціонування.

Доведено, що одними із негативно впливових на узагальнений процес низької ефективності функціонування вищезгаданого електроенергетичного комплексу гірничорудних підприємств з підземними способами видобутку залізної руди є зниження, по факту поглиблення процесу видобутку,

показників якості електроенергії, де в своєму зростанні домінують такі їх складові як відхилення напруги (ΔU) та розмах її змін (δ_U).

Підтверджено – варіативність змін цих показників носить стохастичний характер, що не надає позитиву, в віддзеркалені наслідків цього процесу на режими роботи як індивідуальних споживачів електроенергії, так і електроенергетичного комплексу в цілому.

Без оперативної, в часі, керованості рівнями показників якості електроенергії процес підтримання їх на значеннях, котрі визначені стандартними, неможливо.

Проведене на основі розробленої математичної моделі моделювання показників якості електроенергії надало можливість розробки формату алгоритму та варіанту поточного керування цими показниками. Для реалізації кінцевого варіанту розроблено системи керування ПЯЕ. Обґрунтовано можливість використання для цього управлінського процесу базового елемента – динамічного відновлювання напруги. Створено просторового стану модель з перетворенням Парка-Горєва, що дозволяє аналізувати процеси та отримувати оптимальні значення регуляторних параметрів.

Мета досліджень: поліпшення показників якості електроенергії в електроенергетичних комплексах: електропостачання – електроспоживання підземних рудників з видобутку залізної руди шляхом розробки теоретичних аспектів та практичних рішень для створення системи оперативного керування процесом підтримання в межах стандартних рівнів напруги живлення в структурах зазначених електроенергетичних систем.

Для досягнення мети у роботі вирішувались наступні **наукові задачі:**

– оцінити та формалізувати в рейтинговому форматі, на основі аналізу процесу функціонування внутрішньопромислових систем електропостачання, показники якості електроенергії та визначити найбільш впливові з них на узагальнений стан функціонування електроенергетичного комплексу підземних рудників з видобутку залізної руди; сформувати «дорожню карту» пошуку технічно реалізуємих та економічно доцільних, в сучасному варіанті

виконання, шляхів підвищення рівня оціненого, як системоутворюючого, показника серед загально негативних ПЯЕ до стандартних значень;

- розробити та сформулювати багатофакторну модель якості електроенергії та проведення вартісно-цільового аналізу з оцінюванням рівня змін найбільш впливового показника, з комплексу стандартизованих значень, з метою визначення оптимальної керованості процесом підтримання його на стандартизованих рівнях;

- розробити математичну модель системи стабілізації напруги живлення індивідуальних електропримачів підземних рудників з урахуванням фізичних процесів у ній, дослідити перехідні процеси розімкненої і замкненої систем, обґрунтувати спосіб регулювання та розробити систему автоматизованого керування рівнями напруги в електромережах підземних залізрудних рудників та оцінити якість перехідних процесів в такій системі;

- запропонувати та рекомендувати для реалізації, при невідповідності ПЯЕ в перехідних процесах в базовому варіанті стабілізації напруги, спосіб оптимізації системи керування рівнями напруги в електромережах підземних залізрудних рудників, обґрунтувати формат цільової функції, здійснити оптимізацію системи автоматизованого керування та підтвердити ефективність розробленої системи під час роботи в умовах характерних для підземних залізрудних рудників шляхом моделювання у MATLAB/Simulink.

Наукова новизна:

- вперше на основі статистичної обробки результатів експериментальних досліджень, поряд з визначенням стохастичності характеру змін ПЯЕ в часі функціонування електроенергетичних комплексів: електропостачання - електроспоживання діючих підземних гірничорудних підприємств, проведено оцінювання індивідуальної варіативності їх змін та встановлено пріоритет - рейтинг рівня негативного впливу з всієї їх гами: локальних показників відхилення напруги (ΔU) та розмах її зміни (δ_U);

- доопрацьовано концепцію, котра розширює можливості проведення аналізу природи коливань рівнів напруги живлення комплексу:

електропостачання – електроспоживання та відповідних змін ПЯЕ, як поняття «викидів» для застосування методики статистичного моделювання цього процесу в умовах підземних рудників з видобутку залізної руди;

- вперше запропоновано метод дослідження показника якості електроенергії – відхилення напруги живлення, в парадигмі теорії зазначеного показника якості електроенергії з врахуванням стохастичного характеру процесу її споживання, що дозволило визначити напрямки вартісно-цільового аналізу та розробити адекватну модель оптимізації рівнів сплати за її споживання в функції часу в межах існуючих добових графіків;

- уперше запропоновано, обґрунтовано та реалізовано комплексний підхід до оперативного керування рівнем напруги при її відхиленні від стандартизованих значень в умовах електромереж підземних рудників шляхом використання динамічного відновлювача напруги з індивідуальною схемою стабілізації напруги живлення для чутливих підземних електроприймачів та застосування методу регулювання напруги, здатного підтримувати на потрібному рівні амплітуду і фазу напруги, що дозволяє у своєму базовому варіанті при керуванні динамічним відновлювачем напруги з лінійно-квадратичним регулятором у зворотному зв'язку за станом забезпечити прийнятні (час перехідного процесу не більше 1 мілісекунди і перерегулювання не більше 16,35 %), але потребуючі покращення, показники якості перехідних процесів у системі;

- удосконалено методику автоматизованого налаштування лінійно-квадратичного регулятора динамічного відновлювача напруги, що стабілізує напругу в електромережах підземних рудників при її відхиленнях від стандартизованих значень з використанням еволюційного генетичного алгоритму, який шляхом використання інтегральної абсолютної похибки як критерія оцінювання якості регулювання, що одночасно враховує величини перерегулювання та часу перехідного процесу в системі, при оптимальних параметрах еволюційного пошуку (числу хромосом – 40, інтенсивності мутації матриць стану й входу 2 і 0,5, відповідно, тривалості – 200 генерацій),

дозволив досягнути відсутності перерегулювання (у певних каналах максимальне значення не перевищує 0,0058 %) та скорочення до 95 % часу перехідного процесу якщо співставляти з розімкненою системою.

Структура пояснювальної записки дисертаційного дослідження сформована наступним чином.

У Вступі наведено актуальність, мету та наукові завдання для досліджень, а також наукову та практичну цінність даного дослідження.

У Розділі 1 на основі аналізу стану функціонування гірничо-металургійної галузі України та їх складових - електроенергетичних комплексів і систем підземних рудників з видобутку залізної руди сформовано та викладено логістику наукового пошуку.

У Розділі 2 приведено результати аналітичних та експериментальних розрахунків показників якості електроенергії. Оцінено та визначено системоутворюючі складові цього комплексу. Проведено та висвітлено результати прогнозного оцінювання перспектив змін аналізуємих показників.

У Розділі 3 викладені енергоекономічні аспекти з оцінювання, шляхом моделювання, якості електроенергії. Визначено зв'язок понять: якість електроенергії та якість її споживання. Запропоновано методику моделювання якості добового споживання електроенергії з урахуванням тарифів – граничних цін за надавану електроенергію на енергоринку держави. Наведено доцільність використання розробленої та пропонуємої для практичної реалізації матмоделі.

У Розділі 4 та у Розділі 5 у результаті наукового пошуку було обґрунтовано доцільність задіяння динамічного відновлювача напруги в електромережах підземних рудників для оперативного регулювання рівнів напруги при її відхиленнях від стандартизованих значень на чутливих до змін електроприймачах. Розроблено просторово-стану модель динамічного відновлювача напруги та проведено аналіз її перехідних процесів в розімкненому контурі з урахуванням параметрів схеми заміщення системи.

Для покращення якості регулювання запропоновано використати замкнену системи керування з лінійно-квадратичним регулятором, параметри якого оптимізуються еволюційним генетичним алгоритмом на базі критерію інтегральної абсолютної похибки. Оптимізація забезпечила суттєве зменшення перерегулювання та часу перехідного процесу в системі. Ефективність створеної системи оперативного стабілізації напруги живлення індивідуального електроприймача в умовах характерних для підземних залізородних рудників, що базується на керованому динамічному відновлювачі напруги підтверджена шляхом моделювання в MATLAB/Simulink, що вказує на доцільність її практичного впровадження.

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

У Додатках викладені матеріали досліджень, котрі доповнюють основний текст дисертації, а також Акти впровадження отриманих результатів пошуку для проєктування та втілення їх в практику роботи гірничорудних підприємств та в процес ведення учбово-навчального процесу для відповідних фахових спрямувань в сфері освітянської діяльності здобувачів вищої освіти 1-3-го рівнів.

Ключові слова: системи електропостачання, електроенергетика, керування, управлінські дії, моделювання, гірничодобувні підприємства.

ANNOTATION

Kotiakova M.G. Operational control of supply voltage of consumers of electrical networks of underground mines. – Qualification scientific work in the form of a manuscript

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 141 “Electrical power engineering, electrical engineering and electromechanics” branch of knowledge 14 “Electrical engineering”. – Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, 2026.

The mining and metallurgical industry is a basic sector of the Ukrainian economy and, at the same time, is the largest consumer of electricity among other industrial productions in Ukraine.

Enterprises of the above-mentioned industry traditionally belong to the category of energy-intensive and energy-dependent productions, which is due to a certain level of conservatism of the technology of their functioning.

Moreover, according to the same technology, the components of the above-mentioned type of industrial complex - mining enterprises, including mines with underground methods of iron ore extraction as basic components of metallurgical production, over time, their operation creatively worsens, in its final definition, the energy efficiency indicator of these types of production.

The "road map" of scientific research formed in the work with the analysis of processes in the intra-mine complex: electricity supply - electricity consumption allowed us to form a rating of electricity quality indicators with the determination of the most influential of them on the quality of functioning of the above-mentioned electric power complex in the aggregate version of its functioning.

It has been proven that one of the factors negatively influencing the generalized process of low efficiency of the functioning of the aforementioned power complex of mining enterprises with underground methods of iron ore extraction is the decrease, upon deepening of the mining process, of electricity

quality indicators, where their growth is dominated by such components as voltage deviation (ΔU) and the range of its changes (δ_U).

It has been confirmed that the variability of changes in these indicators is stochastic in nature, which does not bode well for the consequences of this process on the operating modes of both individual electricity consumers and the electric power complex as a whole.

Without timely control over the levels of electricity quality indicators, the process of maintaining them at the values determined by the standard is impossible.

The simulation of power quality indicators carried out on the basis of the developed mathematical model provided the opportunity to develop an algorithm format and a variant of current control of these indicators. To implement the final variant, PQI control systems were developed. The possibility of using the basic element for this management process - dynamic voltage recovery - was substantiated. A spatial state model with the Park-Gorev transformation was created, which allows analyzing processes and obtaining optimal values of regulatory parameters.

The purpose and task of the research: improvement of electricity quality indicators in power plants: power supply - power consumption of underground iron ore mines by developing theoretical aspects and practical solutions for creating a system of operational management of the maintenance process within the standards of power supply voltage levels in the structures of the specified power systems.

To achieve the goal, the following **scientific tasks** were solved in the work:

- to assess and formalize in a rating format, based on an analysis of the process of functioning of intra-industrial power supply systems, electricity quality indicators and determine the most influential of them on the generalized state of functioning of the electric power complex of underground iron ore mines; to form a "road map" for searching for technically feasible and economically feasible, in the modern version of implementation, ways to increase the level of the estimated, as a system-forming, indicator among the generally negative PQI to standard values;

- develop and form a multifactor model of electricity quality and conduct a cost-effectiveness analysis with an assessment of the level of changes in the most influential indicator, from a set of standardized values, in order to determine the optimal controllability of the process of maintaining it at standardized levels;

- to develop a mathematical model of a voltage fluctuation compensation system in underground mines taking into account key physical processes, to investigate the dynamics of the system in an open and closed control loop, to substantiate the method of regulation and to develop a system for automated control of voltage levels in electrical networks of underground mines and to assess the quality of transient processes in it;

- to propose and recommend for implementation, in case of PQI inconsistency in transient processes in the basic voltage stabilization option, a method for optimizing the voltage level control system in underground mine power grids, to justify the choice of the objective function, to optimize the automated control system and its modeling in MATLAB/Simulink to confirm the effectiveness of the developed system for conditions typical of underground mines.

Scientific novelty:

- for the first time, based on statistical processing of experimental research results, along with determining the stochastic nature of PQI changes during the functioning of power complexes: power supply - power consumption of operating underground mining enterprises, an assessment of the individual variability of their changes was carried out and a priority was established - a rating of the level of negative impact from their entire range: local voltage deviation indicators (ΔU) and the magnitude of its change (δ_U);

- the concept has been refined, which expands the possibilities of analyzing the nature of fluctuations in the voltage levels of the power supply complex: power supply - power consumption and the corresponding changes in PQI, as the concept of "emissions" for applying the static modeling method of this process in the conditions of underground iron ore mines.;

- for the first time, a method for studying the electricity quality indicator - supply voltage deviation - was proposed in the paradigm of the theory of the specified electricity quality indicator, taking into account the stochastic nature of the process of its consumption, which allowed us to determine the directions of cost-target analysis and develop an adequate model for optimizing payment levels for its consumption as a function of time within the existing daily schedules;

- for the first time, a comprehensive approach to operational control of the voltage level when it fluctuates relative to standardized values in the conditions of underground mine power grids has been substantiated and implemented by using a dynamic voltage restorer with an individual compensation scheme for sensitive electrical receivers and applying a stabilization method capable of maintaining both the amplitude and phase of the supply voltage at the required level, which allows, in its basic version, when controlling a dynamic voltage restorer with a linear-quadratic regulator in feedback on the state to provide acceptable (transition time no more than 1 millisecond and overshoot no more than 16.35%), but requiring improvement, indicators of the quality of transient processes in the system;

- the method of automated tuning of a linear-quadratic dynamic voltage regulator for compensating voltage fluctuations in underground mine power grids was improved using a genetic algorithm, which, through the use of integral absolute error as a universal criterion of regulation quality, capable of simultaneously taking into account overregulation and the time of the transient process in the system, with optimal evolutionary search parameters (number of chromosomes – 40, mutation intensity of the state and input matrices 2 and 0.5, respectively, duration – 200 generations), allowed to ensure the absence of overregulation (the maximum value does not exceed 0.0058% in certain channels) and reduce the time of the transient process to 95% compared to a system without feedback.

The structure of the explanatory note of the dissertation research is formed as follows.

The Introduction presents the relevance, purpose and scientific objectives of the research, as well as the scientific and practical value of this study.

In Section 1, based on an analysis of the state of functioning of the mining and metallurgical industry of Ukraine and their components - power complexes and systems of underground iron ore mines, the logistics of scientific research are formed and outlined.

Section 2 presents the results of analytical and experimental calculations of electricity quality indicators. The system-forming components of this complex are assessed and defined. The results of the predictive assessment of the prospects for changes in the analyzed indicators are carried out and highlighted.

Section 3 presents the energy-economic aspects of assessing, by modeling, the quality of electricity. The relationship between the concepts: electricity quality and the quality of its consumption is determined. A methodology for modeling the quality of daily electricity consumption is proposed, taking into account tariffs - marginal prices for the supplied electricity on the state energy market. The feasibility of using the developed and proposed for practical implementation mathematical model is presented.

In Section 4 and Section 5, as a result of scientific research, the feasibility of using a dynamic voltage restorer in underground mine power grids for operational control of voltage levels when it deviates from standardized values on sensitive electrical receivers was substantiated. A spatial-state model of a dynamic voltage restorer was developed taking into account real system parameters and an analysis of its dynamics in an open loop was conducted. To improve the quality of regulation, it was proposed to use a closed-loop control system with a linear-quadratic regulator, the parameters of which were optimized using a genetic algorithm based on the integral absolute error. Optimization allowed to significantly reduce overshoot and the time of the transient process in the system. The simulation conducted in MATLAB/Simulink confirmed the effectiveness of the proposed operational control system using a dynamic voltage restorer to maintain a stable voltage on the electrical receiver in conditions typical of underground mines, which indicates the feasibility of its practical implementation.

The General Conclusions provide a summary of the research results and recommendations for their further use.

The Appendices contain research materials that supplement the main text of the dissertation, as well as Acts of implementation of the obtained search results for designing and implementing them in the practice of mining enterprises and in the process of conducting the educational process for relevant professional areas in the field of educational activities of higher education applicants of the 1st-3rd levels.

Keywords: power supply systems, electric power engineering, management, managerial actions, modeling, mining enterprises.

ПЕРЕЛІК НАУКОВИХ ПРАЦЬ ЗДОБУВАЧА КОТЯКОВОЇ МАРИНИ ГЕННАДІЇВНИ

Монографії

[1] 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.

[2] 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

[3] 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.

Статті

[4] 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>

[5] 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> (Scopus)

[6] 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. (Scopus)

[7] 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>

[8] 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>

[9] 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>

[10] Сінчук І., Котякова М. Дослідження несиметричних режимів трифазних чотирипровідних мереж з розосередженою генерацією. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences*. 2022. № 5(313). С. 233-237. DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2022-313-5-233-237>

[11] Козакевич І., Котякова М. Аналіз впливу джерел розосередженої генерації на якість електричної енергії. *Вісник Криворізького національного університету*. 2021. Вип. 52. С. 175-179. DOI: <https://doi.org/10.31721/2306-5451-2021-1-52-175-179>

Тези

[12] Kotiakova M.G., Kozakevich I.A., Holiver N.O. Ways of elimination of asymmetric operating modes of sources with dispersary generation. Міжнародна науково-технічна конференція «Розвиток промисловості та суспільства». Криворізький національний університет. Криворізький національний університет. Кривий Ріг, 2021. С. 63.

[13] Котякова М. Г. Аналіз існуючих структур мереж з розподіленою генерацією. Results of modern scientific research and development. Proceedings of the 6th International scientific and practical conference. Barca Academy Publishing. Madrid, Spain. 2021. Pp. 21-27. URL: <https://sci-conf.com.ua/vi-mezhdunarodnaya-nauchno-prakticheskaya-konferentsiya-results-of-modern->

scientific-research-and-development-22-24-avgusta-2021-goda-madrid-ispaniya-arhiv/.

[14] Сінчук І.О., Котякова М.Г. Рейтингове оцінювання показників якості електроенергії у внутрішньопромислових електричних мережах підземних рудників. Міжнародна науково-технічна конференція «Розвиток промисловості та суспільства». Криворізький національний університет. Кривий Ріг, 2025. С. 128.

[15] Михайленко О.Ю., Сінчук І.О., Котякова М.Г. Оперативне регулювання напруги в електромережах підземних рудників з використанням динамічного відновлювача напруги. Міжнародна науково-технічна конференція «Розвиток промисловості та суспільства». Криворізький національний університет. Кривий Ріг, 2025. С. 133.

[16] Котякова М.Г. Оперативне керування рівнями напруги в системах електропостачання підземних рудників. «Актуальні питання енергоефективності гірничо-металургійного виробництва»: матеріали Х всеукраїнської науково-практичної конференції (Кривий Ріг, 29 травня 2025). Криворізький національний університет. Кривий Ріг, 2025. С. 87.

[17] Сінчук О.М., Михайленко О.Ю., Сінчук І.О., Котякова М.Г. Аналіз показників якості електроенергії при розбудові розумної електромережі підземного рудника. Міжнародна науково-практична конференція «Інформатика. Культура. Техніка» (Одеса, 16-17 жовтня 2025). НУ «Одеська політехніка». Одеса. 2025. С. 502509.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	20
ВСТУП.....	22
РОЗДІЛ 1. ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА ПІДЗЕМНИХ РУДНИКІВ З ВИДОБУТКУ ЗАЛІЗНОЇ РУДИ В УКРАЇНІ. СТАН, ПЕРСПЕКТИВИ	35
1.1 Електроенергетика та гірничо-металургійна промисловість: зв'язок, проблеми, сучасність.....	35
1.2 Системи електропостачання та режими споживання електроенергії приймачами підземних рудників. Стан, проблеми.....	39
1.3 Аналіз результатів та логіки проведення пошуків в публікаціях з напрямку досліджень якості електроенергії в електроенергетичних системах підземних гірничорудних виробництв	47
1.4 Формування мети та наукових завдань для досліджень.....	53
1.5 Висновки до розділу 1.....	55
РОЗДІЛ 2. ПРОЦЕСУАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В РЕАЛІЯХ ФУНКЦІОНУВАННЯ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПІДЗЕМНИХ РУДНИКІВ.....	57
2.1 Загальні поняття до аналізу стану параметричних показників якості електроенергії в електроенергетичних системах підземних рудників.....	57
2.2 Експериментальні дослідження показників якості електроенергії в системах електропостачання підземних рудників.....	58
2.2.1 Вхідні зауваження.....	58
2.2.2 Результати проведення експериментальних досліджень в реальному часі функціонування підземного гірничорудного підприємства.....	63
2.3 Аналітичні дослідження показників якості електроенергії.....	70
2.4 Висновки до розділу 2.....	79

РОЗДІЛ 3. ЯКІСТЬ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В ПАРАДИГМІ ОЧІКУЄМИХ УПРАВЛІНСЬКИХ ДІЙ	81
3.1 Моделювання якості електропостачання в умовах споживання електроенергії приймачами підземних рудників	81
3.2 Синтез факторного впливу на якість електроенергії.....	108
3.3 Висновки до розділу 3.....	121
РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА БАЗОВОГО ВАРІАНТУ СИСТЕМИ ОПЕРАТИВНОГО КЕРУВАННЯ РІВНЕМ НАПРУГИ ЖИВЛЕННЯ В ЕЛЕКТРОМЕРЕЖАХ ПІДЗЕМНИХ РУДНИКІВ	123
4.1 Обґрунтування способу компенсації рівнів відхилень напруги у внутрішніх системах електропостачання підземних рудників	123
4.2 Моделювання динамічного відновлювача напруги.....	132
4.2.1 Модель динамічного відновлювача напруги в просторі станів	132
4.2.2 Визначення параметрів динамічного відновлювача напруги...	137
4.2.3 Моделювання розімкненої системи динамічного відновлювача напруги.....	139
4.3 Керування динамічним відновлювачем напруги зі зворотнім зв'язком за станом моделі.....	146
4.4 Висновки до розділу 4.....	151
РОЗДІЛ 5. ФОРМУВАННЯ ВАРІАНТУ ОПЕРАТИВНОГО КЕРУВАННЯ РІВНЕМ НАПРУГИ ЖИВЛЕННЯ В ЕЛЕКТРОМЕРЕЖАХ ПІДЗЕМНИХ РУДНИКІВ.....	153
5.1 Обґрунтування та логіка застосування принципу лінійно-квадратичного регулювання для керування динамічним відновлювачем напруги.....	154
5.2 Аналіз функціональних можливостей лінійно-квадратичного регулятора динамічного відновлювача напруги в умовах систем електропостачання підземних рудників.....	156

5.3 Вибір способу оптимального налаштування лінійно-квадратичного регулятора динамічного відновлювача напруги.....	166
5.4 Оптимізація замкненої системи керування динамічним відновлювачем напруги з використанням генетичного алгоритму.....	171
5.5 Імітаційна перевірка роботи трифазного динамічного відновлювача напруги з лінійно-квадратичним регулятором налаштованим генетичним алгоритмом.....	185
5.6 Висновки до розділу 5.....	187
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	190
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ.....	194
ДОДАТКИ.....	210
Додаток А. Основні показники функціонування гірничо-металургійної та енергетичної галузей України.....	211
Додаток Б. Узагальнена технологічна характеристика схем внутрішнього та зовнішнього електропостачання підземного рудника з видобутку залізної руди на правах шахти (№ 9) ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг».....	218
Додаток В. Погодинні в добі показники рівнів відхилень напруги живлення СЕП рудника.....	223
Додаток Г. Вартісно-цільові дослідження якості електроенергії.....	227
Додаток Д. Акти, довідки про впровадження результатів дисертаційного дослідження.....	241

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

ЗР	– залізна руда;
ТУ	– технічні умови;
ТЗ	– технічні завдання;
СЕП	– система електропостачання;
ГЗП	– головна знижувальна підстанція;
ЦРП	– центральна розподільча підстанція;
ДЗП	– дільнична знижувальна підстанція;
РП	– розподільчий пункт;
ЛЕП	– лінії передачі електроенергії;
ПЯЕ	– показники якості електроенергії;
НКРЕКП	– Національна комісія що здійснює державне регулювання у сфері енергетики та комунальних послуг;
КСР	– кодекс систем розподілу;
ДСТУ	– державний стандарт України;
НДР	– науково-дослідна робота;
ЕЕ	– електроенергія;
СК	– система керування;
АСК	– автоматична система керування;
ЕОМ	– електронно-обчислювальна машина;
БРЕ	– базові рівні електроенергоспоживання;
ПЕЕ	– показники електроенергоефективності;
ВВП	– внутрішній валовий продукт;
ККВ	– коефіцієнт корисного використання;

ЕЕРВ	– енергоекономічний рівень виробництва;
ГЗК	– гірничо-збагачувальний комбінат;
ЕС	– енергосистема;
ПТБ	– правила техніки безпеки;
ОСР	– оператор системи розподілу;
ПРРЕЕ	– Правила роздрібного ринку електричної енергії;
ЕМС	– електромагнітна сумісність;
МЕК	– міжнародна електротехнічна комісія;
СИГРЕ	– міжнародна конференція великих енергетичних систем;
ДВН	– динамічне відновлення напруги;
ШІМ	– широтно-імпульсна модуляція;
ПП	– перехідний процес.
ЛКР	– лінійно-квадратичний регулятор;
ЯПП	– якість перехідного процесу;
ГА	– генетичний алгоритм;
ІАП	– інтегральна абсолютна похибка;
АРР	– алгебраїчне рівняння Ріккаті;
ФАПЧ	– фазове автопідстроювання частоти;
ЦФ	– цільова функція;
СКГС	– сумарний коефіцієнт гармонічних спотворень;
САК	– система автоматизованого керування.

ВСТУП

Гірничо-металургійна промисловість – базова галузь економіки України і, водночас, найбільший споживач електричної енергії серед інших промислових виробництв держави [1-3].

Підприємства вищенаведеної галузі промисловості традиційно відносяться до категорії енергоємних та енергозалежних виробництв, що обумовлено технологією їх функціонуванням.

Більше того, згідно з все ж тією технологією, складові вищезгаданого виду промислового комплексу – гірничорудні підприємства в числі яких рудники з підземними способами видобутку ЗР, як базові складові процесу металургійного виробництва, з часом їх функціонування креативно погіршують показники енергоефективності. В значній мірі – це пов'язано з постійним зростанням глибин видобутку корисних копалин – залізної руди і відповідною реакцією на це - змінною технологічних та технічних параметрів функціонування електроенергетичного комплексу: електропостачання – електроспоживання даних підприємств [9-11].

Саме цей процес, в значній мірі, нівелює ті позитивні локальні здобутки, котрі досягаються підприємствами в напрямку підвищення енергоефективності видобутку ЗР. В той же час, і що вкрай важливо, це негативно, в комплексі з рядом інших, впливає і на показники якості електроенергії в внутрішніх СЕП даних видів підприємств [12-14].

Актуальність наукового пошуку. Якість електричної енергії – це сукупність властивостей електричної енергії, відповідно до встановлених стандартів, які визначають ступінь її придатності для використання за призначенням.

Відповідно до положень пункту 11.4.6 глава 11.4 розділу XI Кодексу систем розподілу, затвердженого постановою НКРЕКП від 14.03.2018 №310, Параметри якості електроенергії в точках приєднання споживачів в нормальних умовах експлуатації мають відповідати параметрам котрі визначені у ДСТУ EN 50160:2014 «Характеристики напруги

електропостачання в електричних мережах загальної призначеності». Основні показники якості електричної енергії визначені у пунктах 11.4.7 – 11.4.12 глави 11.4 розділу XI КСР.

З поглядів сьогодення, якість електроенергії, а точніше ПЯЕ – це вже стратегічно макроекономічна категорія для України взагалі та для її електроенергетичної галузі зокрема.

Щодо промислових підприємств, то тут особливо неблагоприятна ситуація склалась на їх енергоємних видах і, перш за все, на гірничо-металургійних, доля споживання ЕЕ якими в масштабах загальнодержавного обсягу сягає біля 30 % [15].

Факт усталеності негативу в показниках якості електричної енергії в електричних мережах гірничо-металургійних підприємств формувався вже в 70-х роках минулого століття [15].

Особливо драматична ситуація складається в невідповідності до стандартних фактичних рівнів ПЯЕ в СЕП гірничорудних підприємств і перш за все в підземних рудниках з видобутку залізної руди. Ця неблагоприятна ситуація особливо драматизується в діючий період часу, оскільки складові ПЯЕ в СЕП гірничорудних підприємств продовжують погіршуватись.

Невідповідність існуючих рівнів ПЯЕ – індикатор наслідків поточних негативних змін в технології функціонування СЕП гірничорудних підприємств. В результаті, та завдяки цьому, біля 20% від усього обсягу ЕЕ, котра централізовано надається генеруючими організаціями підземним гірничорудним підприємствам, втрачається при її транспортуванні по внутрішнім СЕП даних підприємств. Якщо до цього додати специфіку гірничодобувних підприємств – постійне зниження рівнів (глибин) видобутку ЗР і логічний супровід цього процесу – розширення структурної конфігурації СЕП з фактом збільшення протяжності ЛЕП, кількості підстанцій та розподільчих пунктів, і, в кінцевому варіанті, природний приріст рівнів втрат ЕЕ та напруги живлення в сегментах аналізуємих електроенергетичних

систем, то отримаємо відповідну оцінку в функції цих змін – стабільну тенденцію негативних змін рівнів ПЯЕ.

Виконання умови природного підтримання ПЯЕ з недопущення рівня їх відхилень від регламентуємих ДСТУ, в умовах специфіки функціонування підземних гірничорудних підприємств є проблематичним і складно реалізуємым рішенням. Пов'язано це з мінливістю та стохастичністю характеру і непрогнозованістю змін в часі режимів функціонування приймачів ЕЕ цих промислових виробництв та відповідною реакцією на це - зміною параметрів СЕП.

В свою чергу, стохастичний характер змін параметрів функціонування СЕП провокує відповідні зміни і ПЯЕ. При цьому, зміни стосуються не тільки їх абсолютних значень, а й співвідношень між собою. Тобто задача пошуку заходів з підтримання ПЯЕ на рівнях стандартизованих значень, враховуючи різноманіття векторів впливу, ускладнюється, що є віддзеркаленням суперечності відомих рішень та показників. При цьому, в виборі тактики пошуку, логічним, вже на стадії стартових позицій, виглядає дослідження в напрямку створення багатофакторної структури керування цим процесом. Саме такі рішення виглядають синонімами впевненості в позитиві їх кінцевих рішень.

Відомі автору з періодичних наукових видань результати, котрі були отримані попередніми пошукачами, і котрі не були реалізовані в практику роботи вітчизняних гірничорудних підприємств з різних причин, підтверджують актуальність, доцільність та необхідність такого пошукового спрямування, як прогресивної і сучасної ідеї, в пошуку шляхів покращення ПЯЕ як системоутворюючого фактору підвищення ефективності функціонування СЕП аналізуємих видів промислових підприємств, а значить і підвищення їх економічної стабільності в позитиві. Водночас вони надають додатковий простір для подальшого наукового пошуку.

Тим паче, що доцільність такого наукового пошуку, з досвіду закордонних споріднених виробництв, та апріорного формату авторського

оцінювання позитиву очікуємого ефекту, вочевидь. Проте зрозуміло, що ця складова технології функціонування гірничовидобувних підприємств являє собою не простий об'єкт керованості.

Окрім цього, відомі кроки наукових здобутків, у відповідності до поставлених задач, відносяться, в основному, до так званого формату «ручного керування», що вже в апіорному баченні, не може претендувати, як ефективно очікуємий варіант вирішення проблеми такого масштабу, по факту потенційної обмеженості цього заходу в технології реалізації поставленої для вирішення наукової задачі.

Тобто, на роль лідера, вже в превентивному баченні шляхів вирішення аналізуємої проблеми, претендує варіант формату автоматизованої керованості процесом покращення ПЯЕ. Однак, до цього треба додати системоутворюючий факт для отримання кінцевого рішення – розбудова такого варіанту АСК не може бути досягнута, з потенційно реалізуємим і достатнім за рівнем ефектом, без наповнення комплексу управлінських дій цієї системи відповідною схемою керованості.

Більше того, як свідчать все ті ж результати, та співставлення умов та технологій функціонування апробованих варіантів таких АСК, в інших, неспоріднених галузях промислових підприємств, з оцінювання доцільності перенесення їх на технології СЕП підземних гірничорудних підприємств, не є доцільним, що визначається все тією ж вищенаведеною специфікою їх роботи.

Логічним, для спрощення процесу наукового пошуку, але не втрачаючи кінцеву мету – підтримання всіх основних ПЯЕ на стандартних рівнях, в форматі превентивного пропонуємого алгоритму функціонування такої СК, виглядає необхідність упередженого практичного оцінювання кожного з складових якості електроенергії з визначенням їх рейтингового впливу і відповідної відбудови схеми оперативного автоматизованого реагування в першу чергу саме на відхилення цих показників з підтриманням їх на регламентуємих рівнях.

Це дозволить не тільки виправити негатив ситуації з ПЯЕ у внутрішній електроенергетиці гірничорудних підприємств, а й, що вкрай необхідно, ефективно та оперативно керувати цим процесом в масштабах електроенергетичних комплексів: електропостачання – електроспоживання в непростих і вельми специфічних для такої реалізації умовах зазначених видів гірничих підприємств. Та, поки-що, це не є чесною практичною реалізацією.

Підкреслюючи вищенаведені бачення автора наведено наступне резюме – безцінний і, практично, поки-що непомірно мало використаний функціонал, в комплексності рішень з покращення ефективності функціонування електроенергетичних комплексів: електропостачання – електроспоживання промислових підприємств взагалі, та гірничорудних їх видів зокрема - в очікуванні своєї реалізації в сфері дотримання стандартів показників якості електроенергії в вищезазначених комплексах.

На вирішення, в авторському баченні, цієї комплексної наукової задачі і спрямовано даний науковий пошук.

Зв’язок роботи з науковими програмами, планами, темами науково-дослідних робіт. Дисертація виконана в контексті науково-дослідницьких робіт, котрі традиційно проводить кафедра електричної інженерії Криворізького національного університету і виконана за пріоритетним напрямом Міністерства освіти і науки України «Енергетика та енергоефективність» відповідно до завдань хоздоговірної науково-дослідницької роботи «Автоматичні установки для регулювання та підтримки коефіцієнта потужності навантаження мережі шляхом компенсації реактивної потужності» (2025 р.) (номер державної реєстрації 19-205-25) та держбюджетної науково-дослідницької роботи «Енергетичний комплекс гірничо-металургійних підприємств з використанням автономних джерел генерації електроенергії функціонуючих на власних відновлювальних енергоресурсах»: етап 2024 року «Підвищення надійності та динамічної стійкості енергетичного комплексу гірничо-металургійних підприємств з використанням автономних джерел генерації електроенергії, функціонуючих

на власних відновлювальних енергоресурсах» (державний реєстраційний номер 0121U111709).

Мета досліджень: поліпшення показників якості електроенергії в електроенергетичних комплексах: електропостачання – електроспоживання підземних рудників з видобутку залізної руди шляхом розробки теоретичних аспектів та практичних рішень для створення системи оперативного керування процесом підтримання в межах стандартних рівнів напруги живлення в структурах зазначених електроенергетичних систем.

Для досягнення мети у роботі вирішувались наступні **наукові задачі:**

- оцінити та формалізувати в рейтинговому форматі, на основі аналізу процесу функціонування внутрішньопромислових систем електропостачання, показники якості електроенергії та визначити найбільш впливові з них на узагальнений стан функціонування електроенергетичного комплексу підземних рудників з видобутку залізної руди; сформувати «дорожню карту» пошуку технічно реалізуємих та економічно доцільних, в сучасному варіанті виконання, шляхів підвищення рівня оціненого, як системоутворюючого, показника серед загально негативних ПЯЕ до стандартних значень;

- розробити та сформувати багатofакторну модель якості електроенергії та проведення вартісно-цільового аналізу з оцінюванням рівня змін найбільш впливового показника, з комплексу стандартизованих значень, з метою визначення оптимальної керованості процесом підтримання його на стандартизованих рівнях;

- розробити математичну модель системи стабілізації напруги живлення індивідуальних електропримачів підземних рудників з урахуванням фізичних процесів у ній, дослідити перехідні процеси розімкненої і замкненої систем, обґрунтувати спосіб регулювання та розробити систему автоматизованого керування рівнями напруги в електромережах підземних залізрудних рудників та оцінити якість перехідних процесів в такій системі;

- запропонувати та рекомендувати для реалізації, при невідповідності ПЯЕ в перехідних процесах в базовому варіанті стабілізації напруги, спосіб

оптимізації системи керування рівнями напруги в електромережах підземних залізородних рудників, обґрунтувати формат цільової функції, здійснити оптимізацію системи автоматизованого керування та підтвердити ефективність розробленої системи під час роботи в умовах характерних для підземних залізородних рудників шляхом моделювання у MATLAB/Simulink.

Об'єкт дослідження: електроенергетичні процеси у внутрішньо-рудниковому комплексі: електропостачання-електроспоживання та їх взаємозв'язок з локальними показниками якості електроенергії.

Предмет дослідження: параметри змін відхилень напруги, розмаху її змін та дози коливань, як домінуючих елементів – складових комплексу показників якості електроенергії в функції варіативності режимів агрегативного функціонування електроенергетичного комплексу підземних рудників.

Методи досліджень.

У роботі використано аналітичні та експериментальні методи досліджень. Аналітичні методи базуються на положеннях теорії ймовірностей і математичної статистики, теорії «викидів», кореляційно-регресійного, компонентного аналізу. Експериментальні методи ґрунтуються на положеннях теорії планування експерименту та електричних вимірів.

Наукова новизна отриманих дослідницьких результатів:

- вперше на основі статистичної обробки результатів експериментальних досліджень, поряд з визначенням стохастичності характеру змін ПЯЕ в часі функціонування електроенергетичних комплексів: електропостачання - електроспоживання діючих підземних гірничорудних підприємств, проведено оцінювання індивідуальної варіативності їх змін та встановлено пріоритет - рейтинг рівня негативного впливу з всієї їх гами: локальних показників відхилення напруги (ΔU) та розмах її зміни (δ_U);

- доопрацьовано концепцію, котра розширює можливості проведення аналізу природи коливань рівнів напруги живлення комплексу: електропостачання – електроспоживання та відповідних змін ПЯЕ, як поняття

«викидів» для застосування методики статистичного моделювання цього процесу в умовах підземних рудників з видобутку залізної руди;

- вперше запропоновано метод дослідження показника якості електроенергії – відхилення напруги живлення, в парадигмі теорії зазначеного показника якості електроенергії з врахуванням стохастичного характеру процесу її споживання, що дозволило визначити напрямки вартісно-цільового аналізу та розробити адекватну модель оптимізації рівнів сплати за її споживання в функції часу в межах існуючих добових графіків;

- уперше запропоновано, обґрунтовано та реалізовано комплексний підхід до оперативного керування рівнем напруги при її відхиленні від стандартизованих значень в умовах електромереж підземних рудників шляхом використання динамічного відновлювача напруги з індивідуальною схемою стабілізації напруги живлення для чутливих підземних електроприймачів та застосування методу регулювання напруги, здатного підтримувати на потрібному рівні амплітуду і фазу напруги, що дозволяє у своєму базовому варіанті при керуванні динамічним відновлювачем напруги з лінійно-квадратичним регулятором у зворотному зв'язку за станом забезпечити прийнятні (час перехідного процесу не більше 1 мілісекунди і перерегулювання не більше 16,35 %), але потребуючі покращення, показники якості перехідних процесів у системі;

- удосконалено методику автоматизованого налаштування лінійно-квадратичного регулятора динамічного відновлювача напруги, що стабілізує напругу в електромережах підземних рудників при її відхиленнях від стандартизованих значень з використанням еволюційного генетичного алгоритму, який шляхом використання інтегральної абсолютної похибки як критерія оцінювання якості регулювання, що одночасно враховує величини перерегулювання та часу перехідного процесу в системі, при оптимальних параметрах еволюційного пошуку (числу хромосом – 40, інтенсивності мутації матриць стану й входу 2 і 0,5, відповідно, тривалості – 200 генерацій), дозволив досягнути відсутності перерегулювання (у певних каналах

максимальне значення не перевищує 0,0058 %) та скорочення до 95 % часу перехідного процесу якщо співставляти з розімкненою системою.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій підтверджуються:

- кількісними та якісними показниками статистичного матеріалу, що дало змогу отримати результати досліджень з достатньою довірчою ймовірністю;
- задовільною збіжністю результатів моделювання і розрахунку з експериментальними даними;
- обробкою результатів експериментального дослідження на ЕОМ за допомогою штучного інтелекту та методів теорії ймовірностей, математичної статистики, методів статистичної кваліфікації кореляційного і компонентного аналізу;
- впровадження основних рекомендацій і висновків в практику розробки проектів сучасних систем електропостачання підземних рудників з видобутку залізної руди.

Наукове значення роботи:

Для теорії – в розробці методології дослідження, оцінювання стану для визначення ПЯЕ в електроенергетичних комплексах: електропостачання – електроспоживання підземних гірничорудних підприємств в умовах невизначеності та неповноти інформації; у розробці математичних моделей для цього, що є ефективними предикторами в прогнозуванні та керуванні показниками якості електроенергії в системах електроспоживання підземних рудників в розробці концепції підходу до побудови комплексів оперативної стабілізації рівнів напруги в електромережах підземного рудника при відхиленні її значень від стандартизованих, та форматизації методики оптимізації систем автоматизованого керування такими комплексами в функції вищенаведеного параметра.

Для практики – у вдосконаленні методів розрахунку і прогнозування змін ПЯЕ в комплексах: електропостачання – електроспоживання підземних

рудників; у розробці рекомендацій щодо оцінювання перспектив змін та поліпшення ПЯЕ шляхом оперативної керованості їх станом. Розроблені в роботі методи оцінювання станів ПЯЕ дозволяють підвищити адекватність рейтингу цих показників, встановити науково обґрунтовані технології їх підтримання на стандартних рівнях в функції чинників підземного гірничорудного виробництва. Розроблена та апробована просторово-стана модель динамічного відновлювача напруги, яку рекомендується застосовувати для моделювання та оцінювання якості перехідних процесів у системах стабілізації напруги в електромережах підземних залізрудних рудників при її відхиленнях від стандартизованих значень. Це дозволяє виконувати проєктування, розробку та адаптування систем керування рівнем напруги живлення з урахуванням реальних динамічних властивостей рудничних електроприймачів та елементів шахтної електромережі, що підвищує ефективність впровадження динамічних відновлювачів напруги у рудничні системи електропостачання. Методика налаштування лінійно-квадратичного регулятора на базі генетичного алгоритму, що була запропонована, дозволяє оптимізувати роботу системи автоматизованого керування динамічного відновлювача напруги з урахуванням специфіки умов роботи електроприймачів в системах електропостачання підземних рудників. Результати, отримані під час дослідження, можуть використовуватись при створенні програмного забезпечення для вбудованих цифрових контролерів, що забезпечують стабілізації напруги в реальному часу, підвищуючи тим самим надійність живлення електроенергією підземних електроспоживачів.

Основні результати роботи в форматі практичних рекомендацій 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 від 22.04.2025 р.

Методичні базові рекомендації щодо впровадження системи оперативного керування ПЯЕ у внутрішньорудникових електричних мережах

передані ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» (Акт передачі від 05.05.2025 р., Додаток Д).

Результати дисертаційного дослідження використовують у Криворізькому національному університеті на кафедрі електричної інженерії при підготовці здобувачів спеціальності G3 електрична інженерія за першим, другим та третім освітніми рівнями вищої освіти. Акт про впровадження від 05.05.2025 р. (Додаток Д).

Особистий внесок здобувача. Основні результати дисертаційної роботи які виносяться на захист, отримано автором самостійно.

У роботах, опублікованих у співавторстві, здобувачеві безпосередньо належать: [1] – запропоновано принципи побудови ефективних систем моніторингу та оперативного управління параметрами якості електроенергії з урахуванням специфіки гірничодобувних підприємств; [2] – проаналізовано дані щодо якості електроенергії в діючому підземному руднику; [4] – запропоновано методику оптимізації витрат на електроенергію підземного рудника на добу, виходячи з того, що в тарифи закладена якість електроенергії; [5] – створено мультифакторну модель для оцінювання якості електроенергії в електромережах підземних рудників; [6] – обробка результатів моделювання; [7] – створено просторово-станну модель динамічного відновлювача напруги; [8] – обґрунтовано підходи до контролю якості електричної енергії в мікромережах (Micro Grid); [9] – запропоновано застосування сучасних технічних засобів компенсації реактивної потужності; [10] – проаналізовано вплив несиметричних навантажень і розподілених джерел енергії на режим роботи мережі та запропоновано методи корекції напруги і оптимізації роботи генераторів; [11] – досліджено зміни в рівнях гармонічних спотворень, коливаннях напруги та частоти, запропоновано використання фільтрів та коригуючих пристроїв.

В опублікованих зі співавторами наукових працях, в яких наведені ідеї та результати, що використані в дисертації, особистий внесок здобувача дорівнює 70-90 %.

Апробація результатів дисертаційного дослідження. Основні наукові положення дисертаційного дослідження доповідались та обговорювались на науково-технічних конференціях: VI International scientific and practical conference “Results of modern scientific research and development” (Madrid, Spain 22-24 August 2021), Міжнародній науково-технічній конференції «Розвиток промисловості та суспільства» (Кривий Ріг, 2021, 2024, 2025 pp.), Всеукраїнській науково-практичній конференції «Актуальні питання енергоефективності гірничо-металургійного виробництва» (Кривий Ріг, 29 травня 2025) Міжнародній науково-практичній конференції «Інформатика. Культура. Техніка» (Одеса, 16-17 жовтня 2025).

Публікації. Основні наукові положення та результати, котрі були отримані при виконанні дисертаційного дослідження висвітлені в наукових працях, в тому числі в 3-х монографіях, виданих в закордонному виданні (Польща, Варшава), в тому числі 2-і англійською мовою, в 8-ми наукових статтях в періодичних виданнях України та країн ЄС, в тому числі внесених до науково-метричної бази даних Scopus (2 публікації) та 6-ти тезах міжнародних та всеукраїнських науково-технічних конференціях.

Структура дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, 5 розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг дисертації становить 247 сторінок, з яких основний зміст викладений на 168 сторінках друкованого тексту, містить 55 рисунків, 21 таблицю. Список використаних джерел складається зі 120 найменувань. Додатки викладені на 38 сторінках друкованого тексту та містять додаткові матеріали, що доповнюють основну частину дисертаційної роботи та відомості про апробацію результатів дисертації.

Автор висловлює подяку колективам енергослужб підприємств ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» та АТ «Криворізький залізрудний комбінат», за можливість і практичну допомогу при проведенні експериментальних досліджень в умовах діючих підземних рудників з видобутку залізної руди цих підприємств.

Подяка автора також співробітникам кафедри електричної інженерії Криворізького національного університету за моральну підтримку та поради в процесі виконання дисертаційного дослідження.

РОЗДІЛ 1

ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА ПІДЗЕМНИХ РУДНИКІВ З ВИДОБУТКУ ЗАЛІЗНОЇ РУДИ В УКРАЇНІ. СТАН, ПЕРСПЕКТИВИ

1.1 Електроенергетика та гірничо-металургійна промисловість: зв'язок, проблеми, сучасність

Електроенергетична система України до 2014 р. являла собою одне із самих потужних електроенергетичних об'єднань серед держав Європи. Загальні встановлені потужності електростанцій держави дорівнювали 54,5 млн. кВт. При цьому по встановленим потужностям та рівням споживання ЕЕ серед інших областей домінує Дніпропетровська область – більше 25 % загальних обсягів використання [16, 17]. Разом з цим показником, зазначимо, що Україна відноситься до когорти країн світу з найбільшим рівнем енергоємності ВВП, що не є позитивним показником як макро, так і мікроекономіки держави. Промисловість держави споживає щорічно більше 70 % від загальнодержавного рівня. В значній мірі це наслідок того, що в державі функціонувало і функціонує в сьогоденні значна кількість підприємств, котрі характеризуються значними рівнями енергоємності [17]. Серед найбільших споживачів ЕЕ традиційно домінують підприємства переробної промисловості (42 %), з котрих гірничо-металургійне виробництво – більше 27 % [17]. До таких відносяться і підприємства з видобутку та переробки залізної руди – стратегічного для держави виду продукції [18, 19].

Видобуток залізної руди в промислових масштабах в Україні, згідно з доступною офіційною інформацією, ведеться з 80-х років 18-го сторіччя [20].

Родоначалником цього процесу є Криворізький залізорудний басейн з центром базування в м. Кривий Ріг, Дніпропетровської області.

Вже на кінець 80-х років зазначеного століття обсяги видобутку ЗР в регіоні склав біля 300 тис. тон [21].

В подальшому когорта видобувачів залізної руди в державі зроста шляхом залучення до цього процесу таких регіонів як м. Керч (Крим),

м. Горішні плавні (Полтавська обл.), м. Дніпрорудний (Запорізька обл.). Проте Криворізький залізорудний басейн був і продовжує лишатись базовим залізорудним регіоном України, в якому в масштабах сьогодення, видобувається більше 85 % загальнодержавного обсягу ЗР і де в процесі подальшої переробки виплавляється більше 80 % чавуну держави [22]. Це віддзеркалює таку позицію характеристики регіону як найбільш енергоємного в Україні, що визначається, перш за все, сумарним відтворенням аналогічних характеристик підприємств Криворізького залізорудного басейну. Системоутворюючою і водночас постійною в своєму зростанні домінуючою складовою в загальному обсязі споживаної енергії гірничорудних підприємств є електроенергетика, котра визначається такими показниками як енергоємність та електроенергоефективність видобутку ЗР [23].

Для пояснення цього факту є ряд причин. Перша з них та, що всі, без винятку, вітчизняні рудники з підземними способами видобутку ЗР проектувались базуючись на ТУ та ТЗ для фіксованих обсягів видобутку та меж ведення підземних робіт, які обмежувались до значення до 1000 м. виключно. Як факт сьогодення - ця межа перетнута і підприємства працюють на додаткових до 1000 м після проектних форматів, на підземних горизонтах 1300-1500 м, з перспективою подальшого зниження глибин до 2000 м. Логічно, що така ситуація провокує відповідне збільшення протяжності внутрішніх СЕП, кількості підстанцій, розподільчих пунктів та індивідуальних споживачів ЕЕ в структурі загальної системи електропостачання підприємства.

Фактично, при доопроєктуванні в структурах СЕП планувалось лише «нарощування» кількості ЦПП, ГЗП, ДЗП та додаткових сегментів ЛЕП. При цьому реальна логіка впливовості цих змін на електроенергетичні параметри функціонування узагальненої СЕП в потрібному обсязі – достатньому для превентивного оцінювання очікуємих змін, при цьому ПЯЕ, як правило, не аналізувалась. Відповідно, щодо недопущення негативних змін в технології функціонування електроенергетики цих підприємств, котрі логічно повинні

були погіршитись, і таки погіршилися в результаті таких змін, з різних причин своєчасно не планувалось. Тобто до негативних рівнів існуючих ПЯЕ додалися додаткові.

Загальний «на сьогодні», стан електроенергоємності, що адекватно електроенергоефективності гірничорудних підприємств, визначається перш за все технологією їх функціонування, а також застарілими, з погляду сучасності, СЕП, та практично давно відпрацювавшим свої технічні ресурси електрообладнанням. Вплинути на першу з вищезазначених складових зі сторони енергетики неможливо, а ось на інші це реально, це необхідно і це в певній мірі реалізується. Проте досягнуті звитяги нівелюються процесами пов'язаними з вищезазначеним процесом постійного поглиблення видобутку ЗР [5, 6]. Тобто це спрямування будучи необхідним має свої технологічні обмеження.

З відомих причин з 2014 р., як в електроенергетичній структурі: генерація – розподіл – споживання ЕЕ, так і в гірничо-металургійній галузі держави, виникло ряд додаткових і, в значній мірі, системоутворюючих в сьогоднішній негативних моментів в сфері ефективності їх індивідуального та агрегативного функціонування [24].

В Додатку А наведені основні показники функціонування гірничо-металургійної та енергетичної галузей України, котрі, в черговий раз, свідчать в реальному часі проблематику в функціонуванні зазначених галузей економіка держави. До переліку вищевизначених «негараздів» доцільно додати і те, що з 2023 року відновила тенденція вартості залізної руди (Додаток А), хоча тут і продовжується притаманна цьому показнику нестабільність та непрогнозованість ціноутворення. Свій несприятливий вклад в цей процес вносить і електроенергетична складова формування ціни, котра набула константного статусу в своєму зростанні (Додаток А) [16-19].

Для більшої наочності та конкретики зазначимо, що на споживачів ЕЕ Дніпропетровської області держави, станом з початку 2022 року, припадає біля 30% загальнодержавного споживчого рівня, більша частка котрої йде на

потреби гірничо-металургійних виробництв регіону, в тому числі Криворізького залізорудного басейну [17, 19].

Та все ж тривіально, але зазначимо, що стабільності в функціонуванні гірничорудних підприємств в державі починаючи з 2022 р. не існує, і, більше того, ряд підприємств галузі в окремі місяці 2023-2024 -х років взагалі не вели видобуток залізної руди. При цьому споживання ЕЕ в таких випадках даними підприємствами не припинялось. Останній факт, в своєму драматизмі, доповнює комплекс негараздів в електроенергочастині гірничорудних підприємств і відповідно в їх економіці. Це потребує креативного підходу в нових сучасних форматах вирішення проблеми підвищення електроенергоефективності даних видів промислових підприємств.

Проте, повертаючись до «негараздів» в енергетичній системі України додамо ще один – системоутворюючий когарту проблем цієї сфери життєдіяльності держави в цілому, та гірничодобувної галузі зокрема – втрати ЕЕ.

Втрати електроенергії при транспортуванні по магістральним ЛЕП в Україні на період 2019 р. визначались на рівні 10,5 млрд. кВт·год. тобто біля 7,5 % від загальнотранспортуємого обсягу [19]. Проте в ряді наукових видань наводяться цифри втрат мінімум в 1,4 рази більші.

Логічно, що станом на початок 2025 р. ці показники в сторону позитиву не відхилялись, а скоріше навпаки.

Як доповнення до цієї тези, додамо, що згідно з дослідженнями вчених ІЕД НАН України, кожні 100 км. ЛЕП 220 кВ генерують 13 МВАр потужності і відповідно для ЛЕП 330 та 500 кВ ці величини складають відповідно 39 МВАр та 96 МВАр. А при половинній загрузці ЛЕП 750 кВ довжиною 400 км вона генерує в мережу біля 700 МВАр реактивної потужності, а при холостому ході - 900 МВАр, які потрібно компенсувати [25-27].

З вищенаведеного формується логічний висновок, що для забезпечення нормального стану функціонування ЕС України необхідно, окрім витримання

балансу між рівнями генеруванням та споживанням ЕЕ, також зменшити до природних рівнів її втрати при транспортуванні по магістральним ЛЕП.

Вищенаведене в повній мірі відноситься і до внутрішньорудникових електроенергетичних комплексів: електропостачання – електроспоживання.

1.2 Системи електропостачання та режими споживання електроенергії приймачами підземних рудників. Стан, проблеми.

Як було зазначено в попередньому підрозділі даного дослідження спосіб, або точніше технологія видобутку КК, визначають і сам формат розбудови СЕП даних видів підприємств. Стосовно внутрішньопромислових структур СЕП підземних гірничорудних підприємств (рудників, шахт), то структурно вони, як правило, існують без суттєвих змін з моменту пуску підприємства в експлуатацію і до моменту його закриття, а нерідко і після цього процесу, якщо підприємство знаходиться в стадії своєї консервації. Єдиними видами змін, щодо внутрішньошахтних СЕП, є те, що стосується процесу їх «нарощування» - доповнень, що прямо пов'язано з процесом пониження рівнів видобутку ЗР та іншими несуттєвими доповненнями в можливій зміні технологічності функціонування конкретного підприємства.

Як правило, внутрішньорудникові СЕП розбудовуються в типовому варіанті радіальних та змішаних структур [26]. Схема електропостачання діючого підземного рудника на правах шахти (№9) шахтоуправління Арселор Міттал Кривий Ріг з видобутку ЗР наведена на рис. 1.1, 1.2. В Додатку Б дано технологічний опис СЕП даного підприємства.

Характерною і системоутворюючою для подальшої розбудови логістики досліджень, рисою функціонування СЕП алізуємих видів підземних гірничодобувних підприємств є те, що режими функціонування їх електроенергетичних комплексів носять безперервний в годинах доби формат, але рівні коливань обсягів споживання ЕЕ значні порівнянні з середньодобовим. Такий характер коливань є як природним - згідно технології роботи цих підприємств, так і з певним ухилом результат ручного керування [27-29].

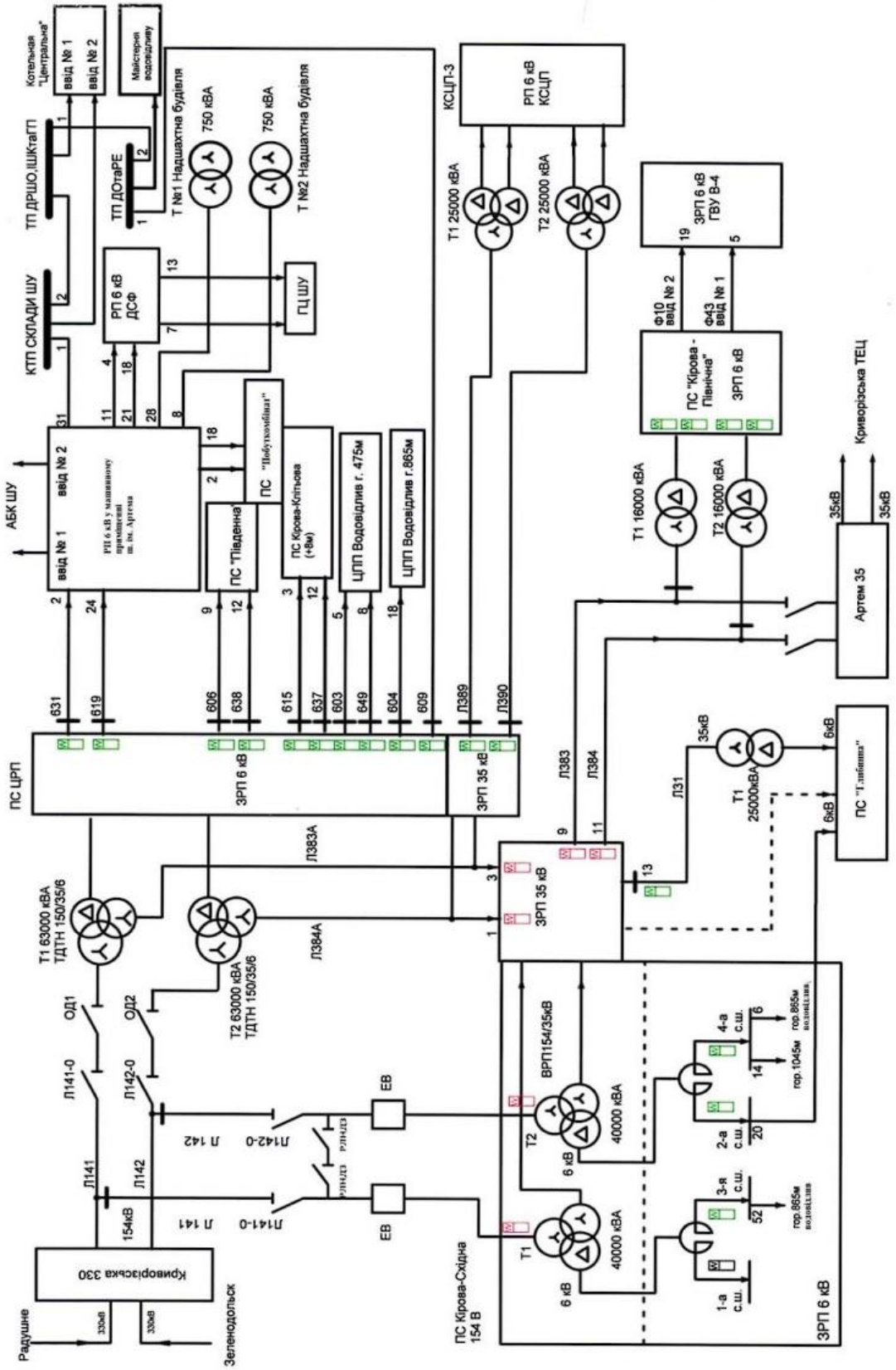


Рисунок 1.1 – Однолінійна схема зовнішнього електропостачання підземного рудника (з видобутку залізної руди на правах шахти (№9) ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг»

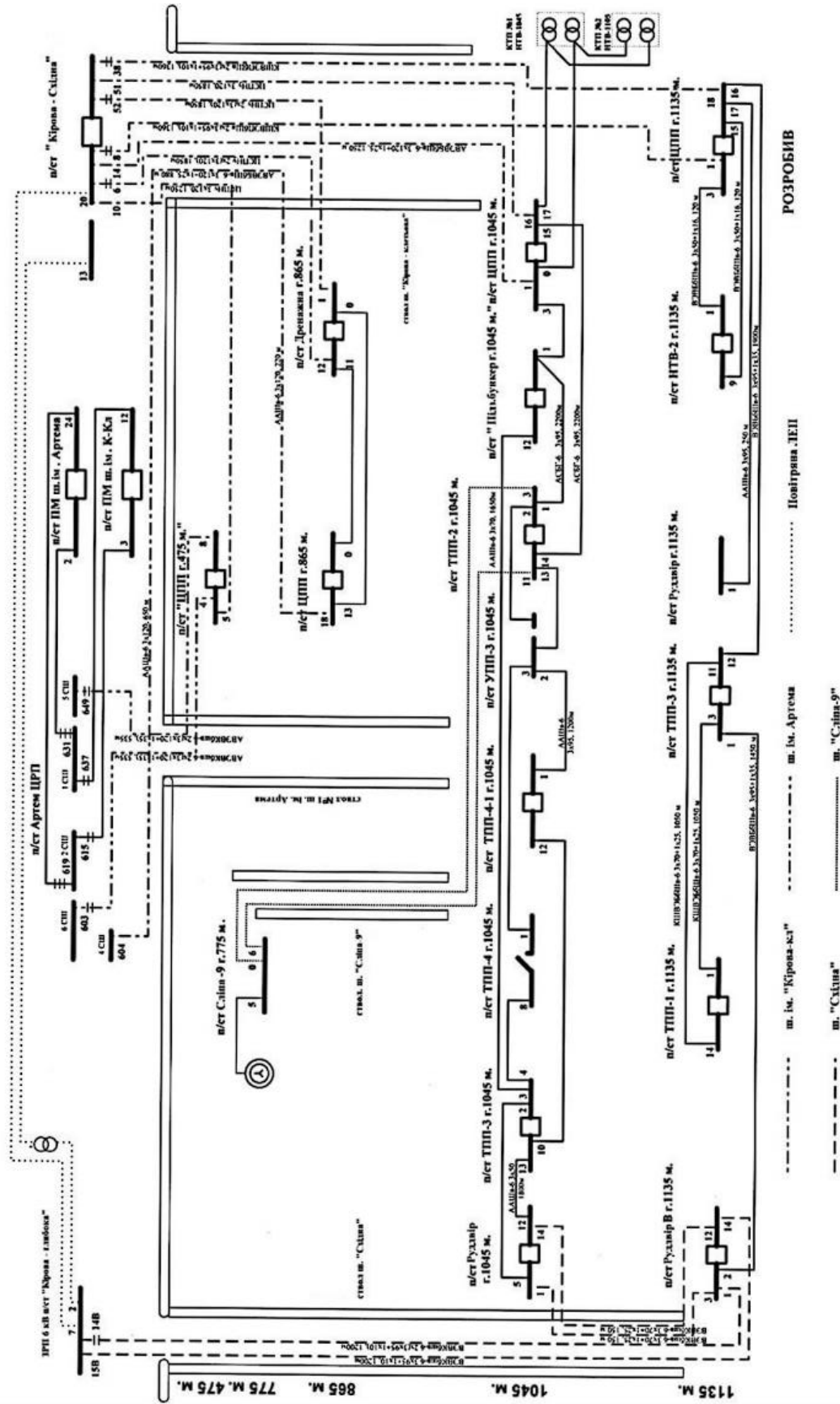
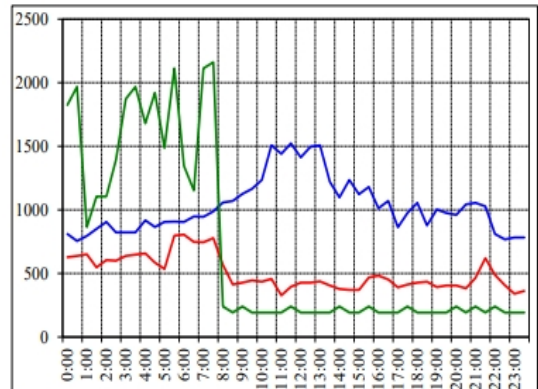
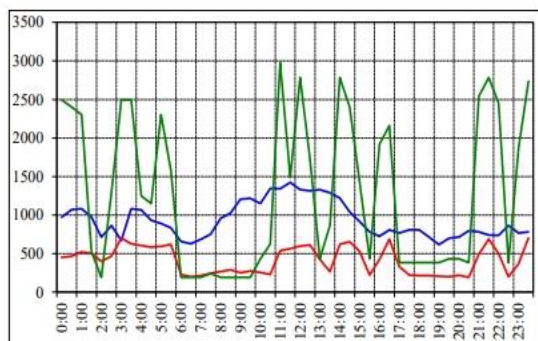


Рисунок 1.2 – Схема підземних кабельних мереж 6 кВ підземного рудника з видобутку залізної руди на правах шахти (№9) ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг»

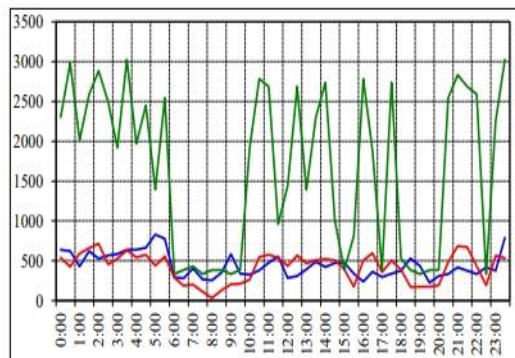
Більше того формати добових коливань навіть по одному і тому ж підземному руднику не повторюються з доби на добу. На рис. 1.3, для прикладу, наведені запозичені з матеріалів попередніх досліджень добові графіки споживання ЕЕ діючого підземного рудника [30].



а)



б)



в)

Рисунок 1.3 – Споживання електроенергії окремими приймачами підземного рудника з видобутку залізної руди на правах шахти №8, м. Кривий Ріг (— в цілому; — дробильно-сортувальною фабрикою; — скіповою підйомною установкою): а) на 31.01.2022; б) на 01.03.2022; в) на 30.04.2022

Оцінюючи дані рис. 1.3, як і інші експериментальні дані, в превентивному наближенні, реально констатувати, що характер процесів в технології функціонування електроенергетичних комплексів: електропостачання – електроспоживання, як процесу, то доцільним для подальшого визначення архітектури розбудови управлінських дій з підтриманням в них на стандартних рівнях комплексу ПЯЕ взагалі, та падіння напруги живлення зокрема, вбачається необхідним проведення більш прискіпливого аналізу – як процесу, з диференціюванням по рівням і видам складових впливу на формат цього процесу. А аналіз [23, 24, 29, 31] показує, що в загальностохастичному, по характеру, процесі споживання ЕЕ, підземним гірничорудним підприємствам, в цьому комплексі присутня постійна складова, яку формують споживачі, режим роботи котрих, з точки зору логіки технології їх функціонування, можна характеризувати в двох варіантах: в номінальному, або близько до цього режиму, та непрацюючому стані, що є характерним для циклічного по характеру виду функціонування механізмів та їх електричних систем.

Як доповнення до вищенаведеного спрощеного формату аналізу добових графіків споживання ЕЕ підземними рудниками з видобутку ЗР додамо і те, що значна складова частина від загального обсягу споживання ЕЕ даних підприємств відноситься до приймачів, котрі не є безпосередніми учасниками процесу видобутку ЗР. Більше того, рівні споживання ЕЕ такими споживачами підземних рудників, про що буде доведено в подальшому включенні в методику досліджень, наближені, а нерідко й перевищують відповідні рівні споживачів, котрі задіяні суто в процесі видобутку ЗР.

Все це формує системоутворюючий висновок, що рівень споживання ЕЕ підземними підприємствами з видобутку ЗР не залежить від поточних обсягів виробництва [30].

На рис. 1.4 наведено як приклад наглядності такого ствердження показники видобутку ЗР і відповідне споживання ЕЕ конкретним діючим рудником – на правах шахти – підрозділу ПАТ «Арселор Міттал Кривий Ріг».

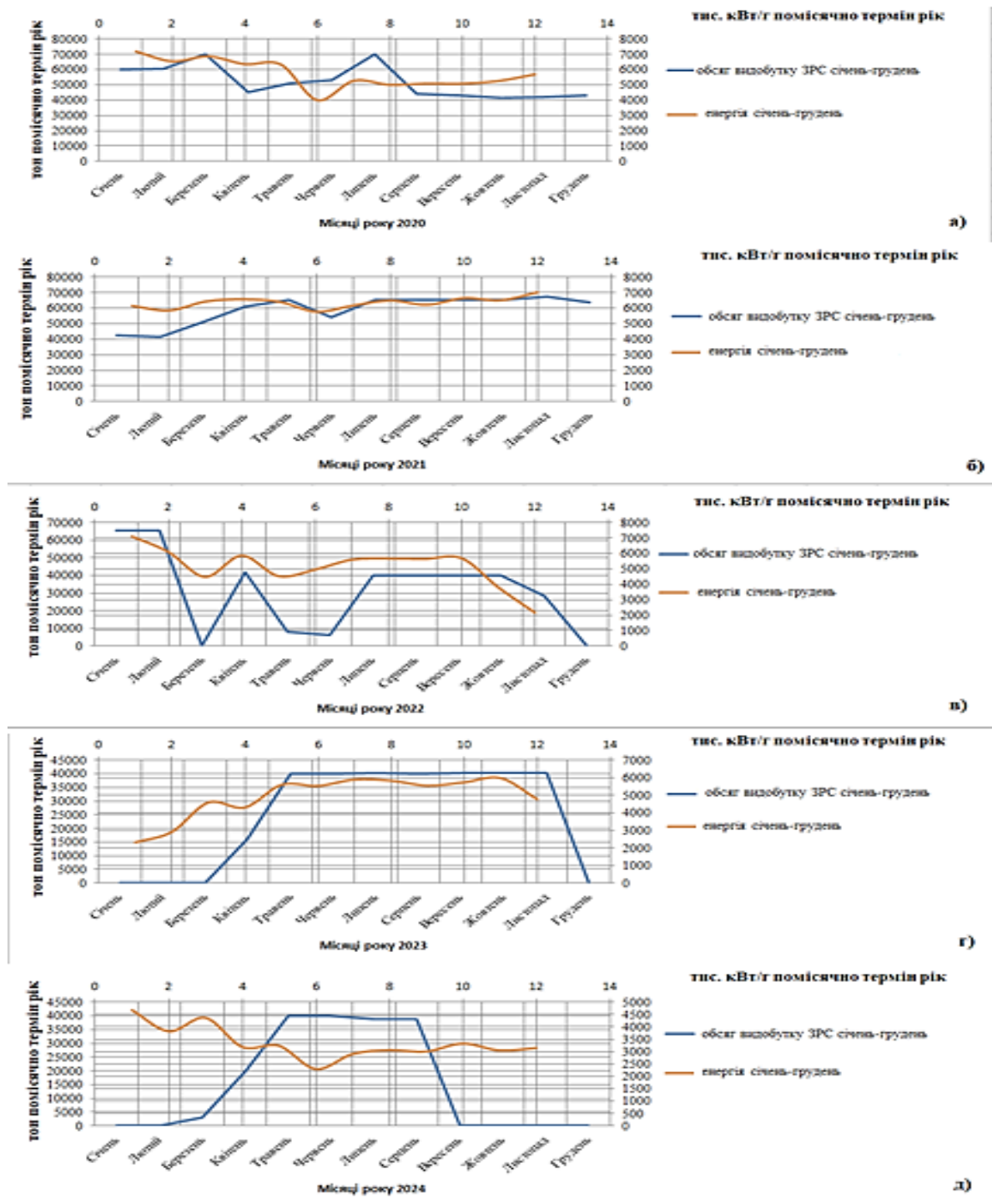


Рисунок 1.4 – Щомісячні рівні споживання електроенергії та обсяги видобутку залізної руди підземним рудником на правах шахти за 2020-2024 роки (шахта №8, м. Кривий Ріг): а) 2020 р; б) 2021 р; в) 2022 р; г) 2023 р; д) 2024 р.

Для економіки підприємства це драматизм, котрий підсилюється фактом погіршення в часі роботи підприємства динаміки змін показників якості ЕЕ [31, 32]. Тобто, підприємство сплачуючи за обсяги спожитої ЕЕ значну частку

цих матеріальних затрат витрачає за електроенергію, котру фактично не використовує, і яка була втрачена при її транспортуванні.

Проте, і, що є одним із інших, окрім втрат електроенергії в комплексі системоутворюючих важелів необхідності дотримання стандартизованих значень, це те, що відхилення фактичних показників (параметрів) функціонування СЕП від номінальних значень, суттєво впливає на термін експлуатації їх складових: силових трансформаторів, електродвигунів та іншого електрообладнання. В розрахунковому варіанті така відповідність забезпечується дотриманням триєдиної умови:

$$S_{мер} = S_n ; U_{мер} = U_n ; \tau_{мер} = \tau_n$$

де $S_{мер}; S_n$ – відповідно реально діюче навантаження та номінальна (паспортна) електрична потужність;

$U_{мер}; U_n$ – відповідна напруга мережі та номінальна (паспортна) напруга приймача;

$\tau_{мер}; \tau_n$ – відповідно температура навколишнього середовища, де встановлений і функціонує приймач, та межа її допустимих значень по паспорту приймача.

Якщо до цього додати, як доповнення, той факт, що відхилення ПЯЕ від нормованих виготовлювачами того чи іншого електрообладнання гарантійних умов, суттєво впливає на їх функціонально-енергетичні показники, то висвітлюється неблаговидна і не прогнозована в кінцевому варіанті ситуація в електроенергетиці підприємств - споживачів ЕЕ. Це в повній мірі відноситься і до силових трансформаторів відповідних підстанцій – ГПП та ДПП СЕП, котрі по причині недозавантаженості додають негативу до факту статусу низьких ПЯЕ в електроенергетиці гірничорудних підприємств.

Як встановлено в результаті експериментальних досліджень автора, і, що доповнює результати досліджень попередників, коефіцієнт завантаженості трансформаторів ГПП підземних рудників Криворізького залізничного басейну за останні роки, в кращому випадку, не перевищував позначки 0,25

[27, 33]. На рис. 1.5 наведені отримані експериментальним шляхом показники рівнів завантаженості ряду трансформаторів ГПП залізодобувних рудників.

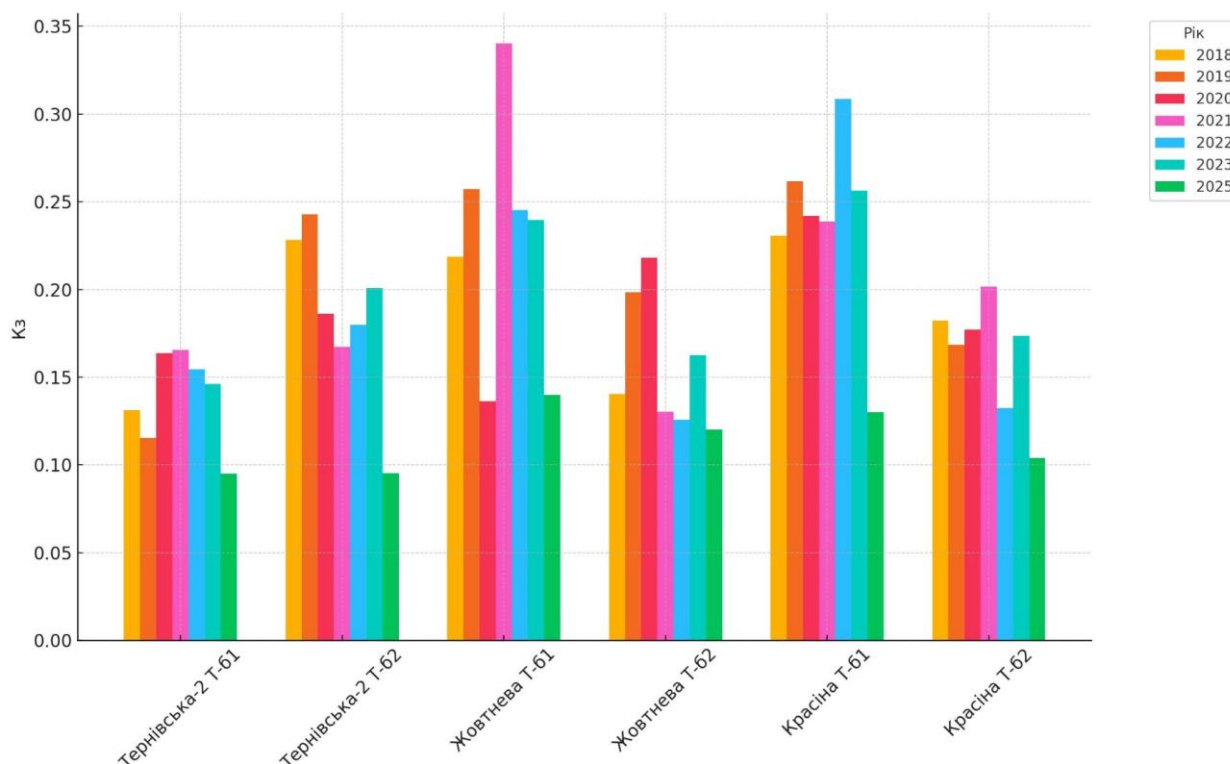


Рисунок 1.5 – Рівні завантаженості трансформаторів ряду головних знижувальних підстанцій підземних рудників Криворізького залізорудного басейну (2025 р.)

Таким чином, аналізуючи в превентивному, але достатньому для оцінювання стану сьогодення електроенергетики підземних рудників з видобутку ЗР, впевненим виглядає ствердження, що стан практично-драматичний. Проте, не зважаючи на ряд системоутворюючих факторів впливу, в тому числі тих, що виникли в останні роки і котрі не відносяться до електроенергетики, але котрі визначають рівень її функціонування, все ж зазначимо, що і в ці часи існують реальні можливості покращення електроенергетичних показників електроенергетичних систем даних видів підприємств. Одним з таких спрямувань є вирішення проблеми підтримання поточних рівнів ПЯЕ на стандартних рівнях, що дасть можливість зменшити втрати ЕЕ у внутрішніх СЕП рудників і тим самим підвищити якість її

використання та значно зменшити матеріальні затрати на придбання даного виду енергії.

1.3 Аналіз результатів та логіки проведення пошуків в публікаціях з напрямку досліджень якості електроенергії в електроенергетичних системах підземних гірничорудних виробництв

Як було зазначено в попередніх підрозділах даного дослідження упередженим рівнем логіки викладання наукового матеріалу, питання електроенергетики взагалі, та ефективності використання ЕЕ зокрема, в умовах виробництв гірничо-металургійної галузі, завжди були і є в епіцентрі наукового пошуку ряду поколінь вчених - дослідників різних країн, у т. ч. України.

Та все ж, оцінюючи, з певним рівнем коректності, відомі, в сфері досліджень автора, дослідження вищезгаданого наукового спрямування, для аналізуємих видів промислових виробництв, з специфікою функціонування їх електроенергетичних систем і комплексів, слід відзначити, як факт, про необхідність продовження процесу подальшого пошуку, в тому числі встановлення рівня кореляційного зв'язку між станом та необхідністю цього спрямування для покращення електроенергоефективності цих видів гірничих підприємств.

Наукові матеріали, котрі автор аналізував, і котрі мають і знайшли своє гідне місце в дослідженні аналізуємої проблеми, додають оптимізму та водночас націлюють на необхідність подальшого підвищення креативу в аналізуємому процесі пошуку.

Щодо конкретики цього аналізу, то вона полягає в наступному. В роботі [23] аналізувався загальний стан енергоефективності гірничорудних підприємств, та наводились варіанти «дорожніх карт» реалізації пропонуємих наукових проєктів. Але це було скоріше узагальненим, хоча і необхідним форматом цього пошуку.

У дослідженнях [34, 35], спираючись на конкретику специфіки функціонування гірничорудних підприємств з підземним способом видобутку ЗР і відповідні варіанти використання, як природних, так і власних енергетичних ресурсів викладена певна гамма варіативних рішень для втілення їх в практику роботи аналізуємих видів виробництв. В цих працях аналізується ефективність створення на базі існуючих СЕП гірничих підприємств нових структур – з розподіленою генерацією ЕЕ.

Проте в зазначених пошуках Недостатньо аналізувалась проблема якості ЕЕ в даних видах гірничих виробництв. Проте саме комплекс складових якості ЕЕ є тією базою яка володіє невитраченим потенціалом підвищення електроенергоефективності даних підприємств, оскільки негативний вплив фактичного стану цих показників на кінцевий варіант – підвищення електроенергоефективності в сьогоденні найбільш впливовий на стан цього показника і, поки що, найменш реалізований.

Цікавим позитивним прикладом для вітчизняних науковців в аналізуємому спрямуванні є досвід закордонних колег [36-39]. Проте, оцінюючи гаму пошуку іноземних науковців та викреслюючи технологію вітчизняних виробництв зазначимо, що тут є свій комплекс специфіки, котрий характерний саме для технології функціонування і відповідної режимності роботи комплексу: електропостачання – електроспоживання вітчизняних підземних гірничорудних підприємств [40].

Однією з важелів недостатнього вирішення проблеми пошуку підвищення якості ЕЕ є відсутність дієвої наукової бази для проведення наукового пошуку в достатньому обсязі.

Основним методом моделювання якості електроенергії в електроенергетичних системах прийнято модельно-орієнтовний підхід, котрий притаманний для програмного комплексу MATLAB. Прикладом робіт, що базуються на даному варіанті можуть слугувати [41] і [42]. Його використання характеризується простотою побудови і аналізу електроенергетичних і електромеханічних комплексів, зокрема, впливу їх

роботи на показники якості електроенергії. Це пояснюється наявністю в системі багаторазово перевірених бібліотек блоків, як-то Simulink, Simscape Power Systems і інструментів аналізу, як-то Powergui. Разом з тим, цей варіант аналізу показників якості має недоліки. Користувачу невідома внутрішня організація блоків, а також сам процес симуляції. Ще більшою проблемою, на наш погляд, є необхідність для моделювання будь-якого показника якості будувати власну систему, що не дозволяє проводити комплексне дослідження і не дає відстежувати ступінь кореляції багатьох факторів на показники електроенергії. Так от в роботі [41] створюється цілий набір моделей для такого аналізу, котрий включає моделі короткого замикання розподільчої лінії та запуску асинхронного двигуна, які використовуються для імітації провалів напруги; модель перемикання конденсаторної батареї, грозових перенапруг для імітації імпульсних перехідних процесів; моделі нелінійних споживачів для імітації несинусоїдальності; модель електродугової печі, що використовується для моделювання збурень напруги. Те ж саме можна побачити і в [42]. Широко при цьому використовувались аналітичні методи.

У роботі [43] досліджена модель оцінки якості електроенергії, що базується на способі аналізу ієрархій, котрий на підставі окремих факторів, як-то відхилення напруги, гармоніки, несиметрія визначає узагальнену якість електроенергії в електромережі. При чому кожен певний фактор має свою вагу, а запропонований підхід зменшує вплив суб'єктивізму в очікуванні рівнів факторів впливу.

Немодифікований спосіб аналізу ієрархічного процесу використаний авторами в пошуку [44] при оцінюванні якості електроенергії в синергетичних системах із значною часткою відновлюваних джерел енергії. В статті вводиться уніфікований індекс якості електроенергії для оцінювання ПЯЕ, як в окремих ділянках, так і всій електромережі в цілому.

Робота [45] присвячена визначенню якості електроенергії з залученням методу (TOPSIS), котрий поєднує спосіб аналізу ієрархій (АНР), міжкритеріальну кореляцію (CRITIC) та метод ентропійної ваги (EWM).

Перший визначає суб'єктивну, а інші – об'єктивну вагу факторів. Метод дозволяє оцінювати вплив різних факторів на якість електроенергії.

Метод міжкритеріальної кореляції (CRITIC) при оцінці якості електроенергії використовується також і в [46].

Пошук в [47] доповнює розглянутий спосіб аналізу ієрархій за рахунок додавання нечіткої логіки. Автори розглядають такий показник якості як «провал» напруги. Визначається, що на рівень «провалу» напруги впливають електричні параметри електромережі та споживачів ЕЕ. При чому вага кожного з параметрів визначається суб'єктивним і об'єктивним методами. Пропонується метод аналізу ієрархічних процесів дає суб'єктивну оцінку важливості фактору, а метод максимізації відхилень – об'єктивну. Зваживши комплексну вагу показників авторами встановлюється ймовірність «провалу» напруги на окремо взятому сегменті СЕП.

Залучення нечіткої логіки, але вже разом з «хмарною теорією» для багатофакторної оцінки якості електроенергії запропонована в [48]. Такий спосіб спрямований на зменшення впливу суб'єктивізму при оцінюванні ПЯЕ.

У дослідженні [49] створена модель для комплексної оцінки якості електроенергії в системі з розподіленою генерацією з залученням багатофакторного дисперсійного аналізу. Автори для кожної ділянки СЕП визначають вагу кожного показника якості і факторів котрі на нього впливають. Це, на їх думку, дасть можливість при підвищенні якості електроенергії робити акцент на тих показниках і факторах, котрі мають найбільший вплив для тієї частини електромережі, в якій заходи будуть застосовані.

У [50] пропонується модель оцінки якості електроенергії мікромережі на основі багатовимірної гаусівської розподілу та аналізу локальної чутливості. Перший використовують для об'єднання окремих показників якості і встановлення кореляції між ними, другий - для надання показникам різної ваги.

Останнім часом в ряді публікацій почали з'являтися роботи, котрі базуються на методах штучного інтелекту з ухилом в бік класифікації показників якості електроенергії.

Так спосіб класифікації відхилення ПЯЕ на основі глибокої згорткової нейронної мережі та багатокласової машини опорних векторів наведений в [51]. S-перетворення залучають для отримання інформації щодо факторів якості електроенергії. Цей варіант показав себе дуже ефективним при значному «зашумленні даних».

Згорткова нейронна мережа, але ансамлевого типу, створена для вирішення такої ж задачі наведена в [52].

У статті [53] пропонується використовувати для класифікації ПЯЕ мережу «глибокого переконання» з напівкерованим навчанням (SDBN), а [54] – вдосконалену щільно зв'язану мережу (DenseNet) з використанням марківського перехідного поля.

У [55] пропонується спосіб класифікації відхилення ПЯЕ в електромережах по вимірним даним, який заснований на алгоритмі випадкового лісу зі зваженою оптимізацією. Тут вейвлет-перетворення і ентропії вибірки задіюють для виокремлення інформації щодо факторів якості електроенергії.

Гідну для очікуемого рівня пошуку та результативну дослідницьку методику визначення аспектів втрат ЕЕ та напруги живлення в СЕП промислових підприємств, а також впливу на їх рівень негативу ряду факторів визначено в дослідженнях [56]. Тут виконано порівняльний аналіз відомих додаткових втрат ЕЕ, котрі спричинені зниженням її якості. Показано, що ці методи, в більшості своїй, є невиправдано складними для їх застосування. В роботі сформовано вимоги та розроблено класифікацію їх застосування для конкретних умов пошуків.

У монографії [57] окреслено в узагальненому варіанті основні поняття та шляхи для підвищення енергетичної ефективності СЕП, наведено аспекти для зменшення втрат ЕЕ при її транспортуванні. Проте, в аналізуємому

дослідженні, на нашу думку, самого формату оцінювання цього показника не наведено.

У [58] сформовано авторський варіант комплексу впливових факторів на режими функціонування СЕП та на ПЯЕ. На жаль в цьому цікавому дослідженні не було, згідно поставленої мети, наведено прогнозного оцінювання змін режимів функціонування СЕП при зміні якості впливових факторів.

У [59] за мету було поставлено оцінювання стану якості напруги в промислових електричних мережах з урахуванням нелінійних навантажень та їх впливу на втрати ЕЕ. Таке оцінювання доцільне в сучасному вбачанні стану функціонування СЕП промислових підприємств. Проте, дослідження могло бути більш реалістичним при використанні базової складової - фактичних показників рівнів відхилень напруги та розмахі її змін в аналізованих електричних мережах.

Окрім аналізу вищенаведених досліджень, результати котрих були викладені в наукових виданнях, аналізувались також, в розрізі наукового пошуку автора, дослідження, котрі виконувались в різні роки в форматі виконання НДР, безпосередньо для і, згідно, умов підземних рудників - залізорудних шахт [60-65].

Так, в наукових дослідженнях [60, 61], на основі багаточисленних експериментальних досліджень, були визначені енергетичні показники функціонування приймачів ЕЕ залізорудних шахт для умов їх роботи на той період часу. Як засвідчили результати експериментів, вже на той період часу, коли обсяги видобутку ЗР підземних підприємств на котрих проводились експерименти, відповідали проектним рівням, режими функціонування їх СЕП були оцінені як недостатньо втішні. Авторами пошуку пропонувались свої варіанти рішень, деякі з котрих були втілені і реалізуються в практиці роботи даного підприємства зараз.

Та все ж, оцінюючи в цілому, як значний позитив вищезгаданих пошуків, зазначимо, що процес їх реалізації на жаль було призупинено і обмежився лише локальним варіантом.

В подальшому подібні дослідження були продовжені [62] і проводяться в дійсний період часу [63-65].

Підводячи підсумки аналізу результатів пошуків науковців, як попередніх, так і діючих періодів часу, зазначимо з певним і необхідним рівнем коректності, що, в більшості своїй, питання аналізу та розробки шляхів покращення ПЯЕ, на категоричну думку автора, розглядались фаховими дослідниками в контексті пошуку варіантів поліпшення електроенергоефективності даних видів підприємств, як правило, в узагальненому варіанті, або навпаки – з надмірною локальністю рішень.

При цьому, ПЯЕ, в такому варіанті пошуків, досліджувались в більшості праць лише «по дотичній» до процесу пошуку шляхів покращення електроенергоефективності аналізованих підприємств.

Логічно, що в такому трактуванні говорити про реальну вагому досяжність в напрямку покращення ПЯЕ до рівнів стандартів, не зовсім коректно, хоча зрозуміло і те, що саме без такого рішення, в комплексі проблем електроенергоефективності, вона - як проблема, не може бути вирішеною в очікуємому та можливо досяжному обсязі.

1.4 Формування мети та наукових завдань для досліджень

Викладені в попередніх розділах даного наукового дослідження результати превентивних пошуків, та отримані висновки, дозволяють стверджувати, що стан ПЯЕ в внутрішніх електричних мережах вітчизняних підземних рудників з видобутку залізної руди потребує свого покращення, оскільки їх стан потенційно віддзеркалюється на недопустимо високих втратах ЕЕ як в загальному комплексі електропостачання – електроспоживання так і в окремих його складових. Для цього необхідна динаміка пошуку в тому числі наукового.

Як відомо [66-69], показники якості електроенергії підрозділяються на дві групи:

- основні ПЯЕ, що визначають властивості електроенергії, які характеризують її якість;
- додаткові ПЯЕ, що є формою запису основних показників, які використовуються в нормативно-технічних документах.

Якість ЕЕ в 3-х фазних електричних мережах, до яких в більшості своїй відноситься СЕП гірничодобувних підприємств, характеризується всіма основними показниками.

Вирівнювання графіків добових навантажень у внутрішньо рудникових електричних мережах, про що йшла мова в підрозділі 1.2 даної наукової записки, як основна вимога дотримання рівнів ПЯЕ протягом усього часу функціонування комплексу електропостачання – електроспоживання в умовах стохастичності характеру змін режимів роботи даних видів гірничих підприємств, нереальна.

У цьому випадку реальними вбачається варіант оперативного керування – реагування на зміни ПЯЕ шляхом відповідних управлінських дій.

Дотримання споживачами ЕЕ показників якості електроенергії в стандартних межах, дозволить, що вкрай актуально в сьогоденні, не тільки заощаджувати матеріальні та паливно-енергетичні ресурси, а й задовольнятися без відчутного впливу на обсяги видобутку ЗР лімітів на ЕЕ, котрі подаються підприємствам генеруючими організаціями.

Мета досліджень: поліпшення показників якості електроенергії в електроенергетичних комплексах: електропостачання – електроспоживання підземних рудників з видобутку залізної руди шляхом розробки теоретичних аспектів та практичних рішень для створення системи оперативного керування процесом підтримання в межах стандартних рівнів напруги живлення в структурах зазначених електроенергетичних систем.

Для досягнення мети у роботі вирішувались наступні **наукові задачі:**

– оцінити та формалізувати в рейтинговому форматі, на основі аналізу процесу функціонування внутрішньопромислових систем електропостачання, показники якості електроенергії та визначити найбільш впливові з них на узагальнений стан функціонування електроенергетичного комплексу підземних рудників з видобутку залізної руди; сформувати «дорожню карту» пошуку технічно реалізуємих та економічно доцільних, в сучасному варіанті виконання, шляхів підвищення рівня оціненого, як системоутворюючого, показника серед загально негативних ПЯЕ до стандартних значень;

– розробити та сформувати багатфакторну модель якості електроенергії та проведення вартісно-цільового аналізу з оцінюванням рівня змін найбільш впливового показника, з комплексу стандартизованих значень, з метою визначення оптимальної керованості процесом підтримання його на стандартизованих рівнях;

– розробити математичну модель системи стабілізації напруги живлення індивідуальних електропримачів підземних рудників з урахуванням фізичних процесів у ній, дослідити перехідні процеси розімкненої і замкненої систем, обґрунтувати спосіб регулювання та розробити систему автоматизованого керування рівнями напруги в електромережах підземних залізородних рудників та оцінити якість перехідних процесів в такій системі;

– запропонувати та рекомендувати для реалізації, при невідповідності ПЯЕ в перехідних процесах в базовому варіанті стабілізації напруги, спосіб оптимізації системи керування рівнями напруги в електромережах підземних залізородних рудників, обґрунтувати формат цільової функції, здійснити оптимізацію системи автоматизованого керування та підтвердити ефективність розробленої системи під час роботи в умовах характерних для підземних залізородних рудників шляхом моделювання у MATLAB/Simulink.

1.5 Висновки до розділу 1

1. Технологічний стан функціонування внутрішніх електроенергетичних

комплексів: електропостачання - електроспоживання підземних рудників з видобутку залізної руди – частки базового для економіки України гірничорудного комплексу, потребує свого креативного покращення.

2. Системоутворюючим, в перспективі покращення функціональних можливостей електроенергетичного комплексу аналізуємих видів гірничих підприємств, є вирішення комплексної проблеми покращення показників якості електроенергії з тактикою диференційованого підходу до кожного окремо взятого показника.

3. Для розробки дієвих заходів з достатнім електроенергетичним ефектом необхідне теоретичне обґрунтування та розробка, котра буде відповідати реаліям та можливостям для практичної рекомендації її для втілення в практику функціонування електроенергетичних комплексів електропостачання електроспоживання гірничорудних підприємств з підземними способами видобутку залізної руди.

РОЗДІЛ 2

ПРОЦЕСУАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В РЕАЛІЯХ ФУНКЦІОНУВАННЯ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПІДЗЕМНИХ РУДНИКІВ

2.1 Загальні поняття до аналізу стану параметричних показників якості електроенергії в електроенергетичних системах підземних рудників

Як було зазначено в Розділі 1 пояснювальної записки даного наукового дослідження, в кінцевому варіанті рівня свого негативного впливу, комплекс ПЯЕ віддзеркалюється на втратах ЕЕ, котрі, в своєму узагальненому вигляді, мають місце як при транспортуванні ЕЕ, згідно комунікаційних зв'язків – ЛЕП, так і при безпосередньому споживанні її при перетворенні у відповідні процеси в структурах приймачів (трансформатори, електричні двигуни, перетворюючі пристрої, тощо) електроенергії. Тобто, втрати ЕЕ, в загальному вигляді, являють собою певні сегменти комплексу загальних рівнів втрат, в електроенергетичній консолі: джерело живлення – приймач електроенергії.

В свою чергу, загальні втрати ЕЕ можна розділити на складові: природно-параметричні та додаткові – штучно створені по факту порушення технології та електричних параметрів функціонування електроенергетичного комплексу.

Задача пошуку – розробка заходів для мінімізації, по максимуму, досяжності, та зменшенню, до можливо достатніх, другі з вищенаведених втрат.

Природні втрати – це втрати рівень котрих визначається виключно фактичними параметрами комунікаційних зв'язків (опорів ЛЕП), а штучні - це в основі своїй результат рівня показників якості електроенергії у відповідних елементах комплексу електропостачання – електроспоживання.

В реальності фактичні втрати електроенергії при її транспортуванні та споживанні відповідними приймачами підземних рудників з видобутку ЗР

перевищують рівні, котрі являють собою природний фактор. Оскільки зменшення природних втрат, хоча і може в певній мірі бути досяжним, але такі заходи являють собою значну проблематику в практиці своєї реалізації, тому логічно, що для підвищення енергоефективності електричних систем треба мінімізувати рівень додаткових втрат з доведенням його, в ідеалі, до нульових значень.

Складність такого формату в реалізації досягнення поставленої мети, для умов саме діючих гірничодобувних підприємств, оскільки введенні в дію нових в масштабах України варіантів не планується в найближчі 30-ть років, вельми ускладнена відсутністю в їх проєктах засобів з реалізації навіть в потенціалі функціонування цих підприємств, відповідних заходів.

Для цього, враховуючи значну кількість факторів негативного впливу на ПЯЕ, в умовах функціонування СЕП діючих гірничорудних підприємств, доцільним вбачається проведення аналізу та оцінювання на цій основі реальних рівнів питомої ваги кожного із агрегативного переліку складових даного електроенергетичного комплексу.

При цьому актуальним буде виглядати оцінювання вищезгаданих ПЯЕ як в аналітичному – модельному так і в експериментальному варіантах з послідовним аналізом отриманих результатів.

2.2 Експериментальні дослідження показників якості електроенергії в системах електропостачання підземних рудників

2.2.1 Вхідні зауваження

Комплекс експериментальних досліджень фактичного стану ПЯЕ проводився у відповідності до існуючих рекомендацій щодо ведення експериментів на діючих підземних підприємствах з видобутку ЗР [67, 68]. Оскільки технологічна ситуація на підземних рудниках в Україні близька або ідентична, то в роботі наведені дані по конкретному типовому в своїй галузі діючому підземному підприємству.

При цьому тактика експериментальних досліджень формувалась на основі розробленої та узгодженої з енергослужбами відповідних підприємств методики, а також з врахуванням досвіду та результатів попередніх пошуків, котрі були надані відповідними службами аналізованого підприємства за ідентичні періоди 2020-2023 років та отриманих в реальному часі – 2025 рік. Така варіативність дослідницького проєкту надала можливість збереження «простору пошуку» в необхідно-потрібному для сучасного сприйняття масштабі.

Стосовно першого з вищезгаданого варіанту, то тут необхідно зазначити наступне. Це «наступне» стосується того, що в цьому варіанті аналізу є певна обмеженість за обсягом інформації – присутність лише показників ΔU з гами інших ПЯЕ. Інші дев'ять ПЯЕ за інформацією енергослужб підприємства знаходились в межах стандартів і випадків перевищення цих рубежів не було зафіксовано. Як буде зафіксовано далі, ця певна обмеженість реально не вплине на кінцевий варіант пошуку, а навпаки підтверджує цю напів гіпотезу напів реальність.

В Додатку В наведені показники відхилень ΔU аналізованого підприємства за ідентичні доби різних років, а табл. 2.1 обчислені відповідні рівні їх відхилень. Ці показники відповідають вимогам щодо формування динамічних рядів з метою побудови прогнозу змін аналізованого ПЯЕ. В табл. 2.1 наведено дані згідно Додатку В.

Вочевидь, що відхилення ΔU від стандартизованих значень сягають значних і якщо спрогнозувати тенденцію подальших змін ΔU при такому форматі, то вона буде виглядати як наведено на рис. 2.1.

Проведений аналіз дає підстави визначати середнє значення представлених рівнів динамічних рядів. Доцільно визначати прогнозні показники процесу, що досліджується на основі отриманих середніх значень.

На рис. 2.2 представлені результати прогнозу відповідно даним Додатку В.

Таблиця 2.1 – Відхилення напруги (%) від стандартних рівнів на клемах віддаленого приймача

час	Δ_{2020}	Δ_{2021}	Δ_{2022}	Δ_{2023}
0	103,889	100,263	100,263	100,000
1	107,500	100,000	99,211	100,263
2	103,889	99,737	100,263	100,263
3	105,833	100,263	100,000	99,737
4	106,111	99,737	100,526	100,526
5	104,722	99,474	100,263	99,211
6	106,667	100,263	99,737	100,263
7	105,278	100,000	100,263	100,526
8	105,833	100,000	100,000	99,737
9	105,278	100,263	100,263	99,737
10	105,833	99,737	100,263	100,526
11	105,833	100,263	99,737	100,263
12	105,000	99,474	100,000	100,000
13	105,556	100,263	99,737	99,211
14	105,833	100,000	99,737	100,263
15	105,278	100,000	99,737	99,211
16	105,556	99,737	100,263	100,263
17	105,278	100,000	100,000	100,526
18	106,389	98,947	100,263	100,000
19	105,278	99,737	99,737	100,263
20	105,556	100,000	99,737	99,474
21	107,778	101,579	100,000	99,737
22	105,556	100,789	101,842	100,789
23	105,278	100,263	100,263	100,263
24	105,556	100,000	100,000	100,000



Рисунок 2.1 – Візуалізація даних таблиці 2.1

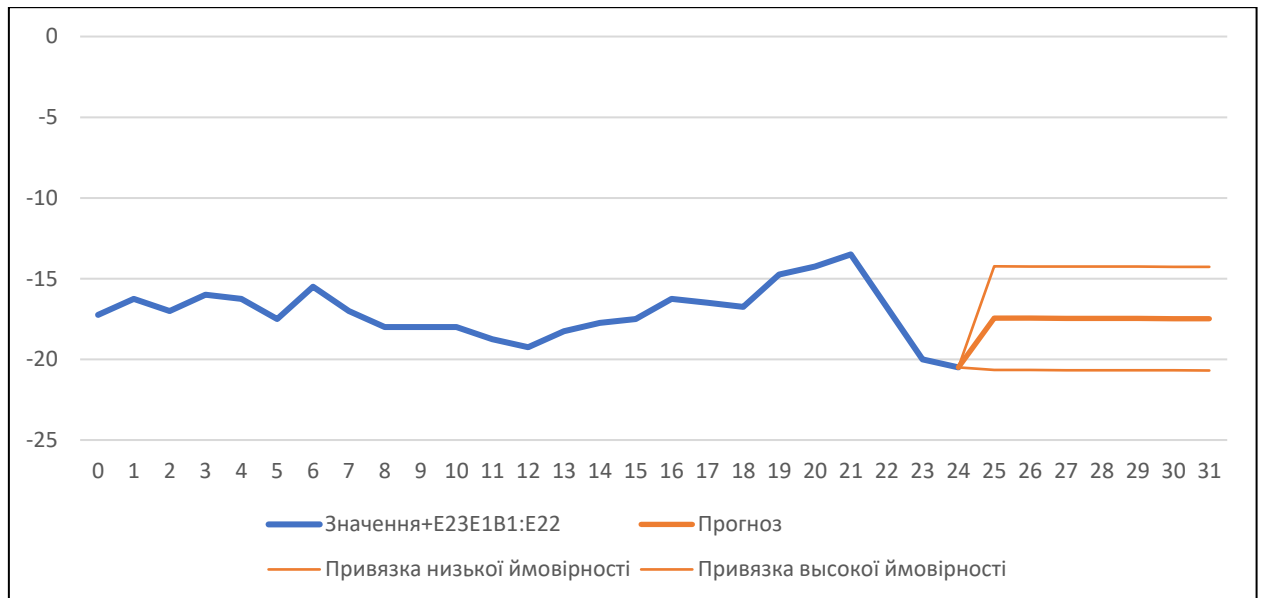


Рисунок 2.2 – Прогнозні дані показника ΔU на основі усереднених значень

Візуальний аналіз добових значень показника свідчить про загалом рівномірний процес. Спостерігаються коливання в період з 18 по 24 гол. Прогнозується стабілізація процесу, що являється логічним, тому як незначний коливальний процес не може значно вплинути на майбутні показники.

Проте, загально відомо, що прогноз – це ймовірнісний процес, якому притаманна невизначеність. Складні сучасні умови, в яких функціонують вітчизняні гірничорудні підприємства, впливають на роботу комплексу: електропостачання – електроспоживання цих підприємств. Тому, отримані прогнозні значення параметрів мають відповідну ймовірність, яка може змінюватися під впливом певних факторів.

Одним із таких системоутворюючих факторів негативного впливу на режими роботи гірничорудних підприємств, як і всіх інших їх промислових видів є ситуація, котра сталася в Україні з 2014 року. Саме з початку цього періоду часу підприємства країни не функціонують в звичному – нормальному режимі.

Більше того, в окремі місяці окремі підприємства взагалі не працювали. Тому експерименти, котрі проводились по визначенню ПЯЕ не є показником цілісних реалій і більше того, як свідчать аналогічні дослідження в умовах даних підприємств в попередні роки, різниця в відхиленнях ПЯЕ, а точніше в рівнях відхилення напруги (ΔU) в підземних мережах даного підприємства значно перевищувала показники сьогодення [60, 61]. Проте, тенденція в співвідношеннях окремих ПЯЕ мало змінилась.

В процесі дослідницьких експериментів у 2025 році за домовленістю з відповідальними працівниками енергослужби вищезначеного підприємства та у відповідності до розділів ПТБ, на основі розробленого та затвердженого керівником підприємства плану проведення експериментів в його реалізації приймали участь працівники енергослужби вищезгаданого підприємства та

науковці кафедри електричної інженерії Криворізького національного університету.

2.2.2 Результати проведення експериментальних досліджень в реальному часі функціонування підземного гірничорудного підприємства

Для проведення вимірювання використовувався прилад НРМ-4 (ver ME-440), який є портативним реєстратором якості електроенергії. Місця вимірювань схематично для умов конкретного рудника на правах шахти ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» показані на рис. 2.3.

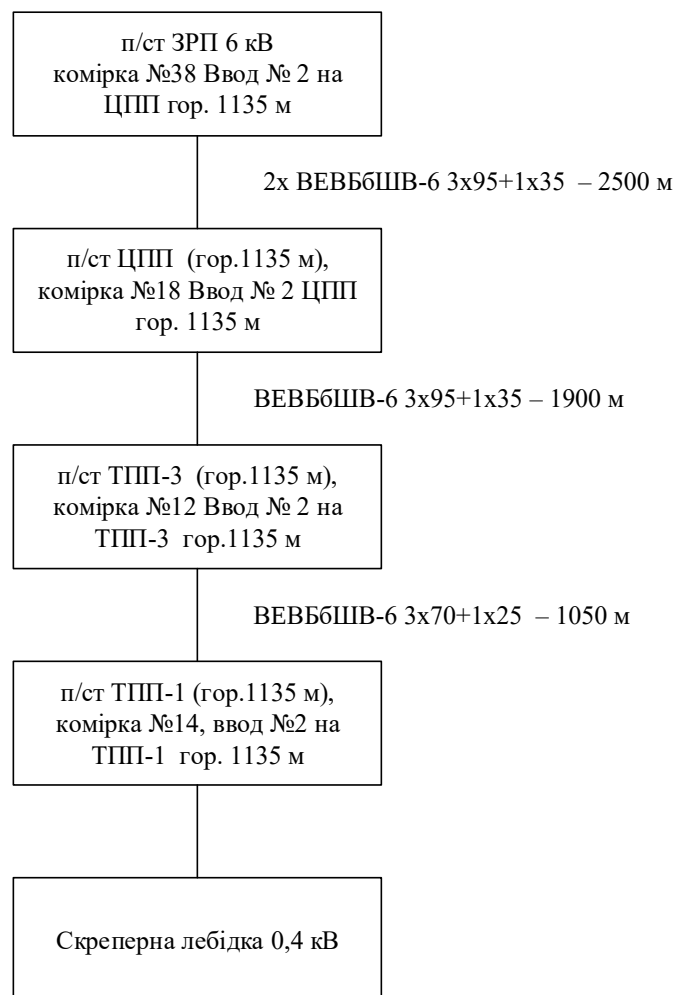


Рисунок 2.3 – Логістика структури проведення вимірювань показників якості електроенергії в електромережі підземного рудника на правах шахти (№9) ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг»

Дані реєструвалися з інтервалом в 1 хвилину протягом декількох діб. Потім було проведено статистичний аналіз та визначено відхилення напруги від стандартизованих значень, максимальні і середні СКГС напруги і струму

та розмах коливання частоти. Результат обробки для електромережі 6 кВ приведений в табл. 2.2 і 2.3.

Таблиця 2.2 – Добові значення показників якості електроенергії електромережі підземного рудника на напрузі 6 кВ (комірка 38 і комірка 18)

Місце	Комірка 38			Комірка 18		
Дата	27.01.25	28.01.25	29.01.25	29.01.25	30.01.25	31.01.25
ΔU_A , %	-6,66	-6,59	-6,83	-7,91	-7,47	-7,72
ΔU_B , %	-6,4	-6,28	-6,1	-7,87	-7,76	-7,05
ΔU_C , %	-6,36	-6,14	-6,69	-7,55	-7,75	-7,44
СКГС(U_A)						
max, %	0,82	0,86	1,18	1,16	1,61	1,67
сер, %	0,61	0,61	0,85	0,84	0,98	1,04
СКГС(U_B)						
max, %	0,74	0,7	1,59	1,16	1,42	1,58
сер, %	0,6	0,46	0,84	0,84	0,55	0,55
СКГС(U_C)						
max, %	0,68	0,7	1,17	1,16	1,44	1,65
сер, %	0,48	0,46	0,84	0,84	0,74	0,77
СКГС(I_A)						
max, %	5,06	0,78	1,77	1,77	5,59	2,79
сер, %	4,41	0,55	1,25	1,25	2,86	2,38
СКГС(I_B)						
max, %	4,52	0,78	2,26	2,26	4,9	2,8
сер, %	3,97	0,54	1,51	1,51	2,66	2,23
СКГС(I_C)						
max, %	4,45	0,81	2,2	2,2	4,58	2,87
сер, %	3,65	0,684	1,73	1,73	2,55	2,34
f_{Amax} , Гц	50,09 (+0,18%)	50,08 (+0,16%)	50,1 (+0,2%)	50,1 (+0,2%)	50,09 (+0,18%)	50,05 (+0,1%)
f_{Amin} , Гц	49,92 (-0,16%)	49,93 (-0,14%)	49,92 (-0,16%)	49,92 (-0,16%)	49,94 (-0,12%)	49,91 (-0,18%)
f_{Bmax} , Гц	50,09 (+0,18%)	50,16 (+0,32	50,13 (+0,36%)	50,13 (+0,36%)	50,01 (+0,02%)	50,22 (+0,44%)
f_{Bmin} , Гц	49,92 (-0,16%)	%) 49,93 (-0,14%)	49,95 (-0,04%)	49,95 (-0,04%)	49,91 (-0,12%)	49,92 (-0,16%)
f_{Cmax} , Гц	50,08 (+0,16%)	50,08% (+0,16%)	50,18 (+0,26%)	50,18 (+0,26%)	50,44 (+0,88%)	50,27 (+0,54%)
f_{Cmin} , Гц	49,94 (-0,12%)	49,91 (-0,18%)	49,98 (-0,1%)	49,98 (-0,1%)	49,92 (-0,16%)	49,98 (-0,04%)

Таблиця 2.3 – Добові значення показників якості електроенергії електромережі підземного рудника на напрузі 6 кВ (ТПП-3 і ТПП-1)

Місце	ТПП-3			ТПП-1		
Дата	03.02.25	04.02.25	05.02.25	05.02.25	06.02.25	07.02.25
$\Delta U_A, \%$	-7,29	-7,94	-8,1	-8,6	-7,18	-7,29
$\Delta U_B, \%$	-7,09	-7,13	-8,38	-8,6	-7,53	-7,09
$\Delta U_C, \%$	-7,14	-7,15	-8,89	-8,21	-7,97	-7,14
СКГС(U_A)						
max, %	2,05	2,05	3,59	3,59	1,32	1,35
сер, %	1,07	1,07	0,69	0,69	0,68	0,83
СКГС(U_B)						
max, %	1,85	1,85	1,45	2,58	1,32	1,35
сер, %	0,61	0,61	0,69	0,69	0,68	0,83
СКГС(U_C)						
max, %	1,94	1,94	1,3	1,3	1,32	1,35
сер, %	0,82	0,82	0,69	0,69	0,69	0,83
СКГС(I_A)						
max, %	2,59	3,55	3,64	3,78	2,87	2,98
сер, %	2,48	1,8	1,89	1,52	1,54	1,97
СКГС(I_B)						
max, %	2,8	4,46	3,04	3,71	2,77	2,75
сер, %	2,38	2,2	1,85	2,06	1,97	1,76
СКГС(I_C)						
max, %	2,68	3,87	3,55	3,11	2,96	2,69
сер, %	2,07	2,04	1,75	2,34	1,79	1,62
$f_{Amax}, \Gamma \Pi$	50,1	50,08	50,41	50,41	50,1	50,07
	(+0,2%)	(+0,16%)	(+0,82%)	(+0,82%)	(+0,2%)	(+0,14%)
$f_{Amin}, \Gamma \Pi$	49,92	49,9	49,92 (-	49,92 (-	49,9 (-	49,93 (-
	(-0,16%)	(-0,2%)	0,16%)	0,16%)	0,2%)	0,14%)
$f_{Bmax}, \Gamma \Pi$	50,12	50,15	50,16	50,16	50,12	50,09
	(+0,24%)	(+0,3%)	(+0,32%)	(+0,32%)	(+0,24%)	(+0,18%)
$f_{Bmin}, \Gamma \Pi$	49,84	49,87	49,87 (-	49,87 (-	49,86 (-	49,9 (-
	(-0,32%)	(-0,26%)	0,26%)	0,26%)	0,28%)	0,2%)
$f_{Cmax}, \Gamma \Pi$	50,11	50,08	50,08	50,08	50,1	50,07
	(+0,16	(+0,16%)	(+0,16%)	(+0,16	(+0,2%)	(+0,14%)
$f_{Cmin}, \Gamma \Pi$	49,92	49,9	49,92 (-	49,92 (-	49,9 (-	49,93
	(-0,16%)	(-0,2%)	0,16%)	0,16%)	0,2%)	(-0,14%)

Проводячи аналіз даних про падіння напруги (табл. 2.2 і 2.3) в електромережі 6 кВ підземного рудника, простежується те, що падіння фазних напруг знаходяться між значеннями -6,1% і -8,9%.

Максимальні падіння спостерігаються в ТПП-1 і ТПП-3, де значення наближені до стандартизованих границь. Найвище падіння напруги (-8,89%) серед всіх вимірів в рудничній електромережі мало місце на фазі С ТПП-1 05.02.2025. Це на 1,11% нижче допустимих -10%. Тут же на фазі В падіння було -8,38%, а на фазі А ТПП-1 – -8,1% того ж дня. Отже, проблема системна.

Не краща ситуація і у ТПП-3. Того ж дня 05.02.2025, падіння фазної напруги на А і В становила -8,6%, а на фазі С – -8,21%. Це дещо, але не дуже, краще ніж на ТПП-1. Проте це все ще близько до стандартизованих -10%.

Якщо співставляти з вищезначеними даними, то в комірці 18 падіння напруги були порівняно меншими: максимальне падіння 29.01.2025 у фазі А - 7,91%, у той же день падіння у фазі В -7,87% та 30.01.2025 у фазі С -7,75%. Дещо краща ситуація в комірці 38. Тут було виміряно найбільше падіння для цієї точки 29.01.2025 у фазі А -6,83%, в той же день у фазі С -6,69% та 27.01.2025 у фазі С -6,36%.

Виміряні в шахті дані (табл. 2.2 і 2.3) вказують на те, що найгірші ПЯЕ за падінням напруги мають місце в ТПП-1 та ТПП-3 електромережі підземного рудника. Тут значення близькі до стандартизованих гранично допустимих і перевищують показники комірок 18 і 38 на в середньому до 2%. Отже чим далі точка виміру від поверхні рудника і ближче до місць проведення робіт з видобутку залізної руди, тим більше падіння напруги.

Проводячи аналіз СКГС струму й напруги в електромережі 6 кВ підземного рудника (табл. 2.2 і 2.3) простежується те, що для напруги максимальні значення СКГС було досягнуто 05.02.2025 у ТПП-1 і ТПП-3 у фазі А, а саме 3,59%, що на 4,41% нижче стандартизованого гранично допустимого значення цього ПЯЕ 8%. У загальному варіанті в середньому значення СКГС напруги були між 0,46% (28.01.2025 комірка 38 у фазах В і С)

та 1,07% (03.02.2025 і 04.02.2025 у фазі А ТПП-1). Отже ПЯЕ за СКГС напруги мають досить прийнятну якість, окрім вищезначеного випадку.

За СКГС струму простежувався більший розмах значень. Це в принципі притаманне цьому ПЯЕ через свою високу залежність від типу електроспоживачі, що підключені до електромережі рудника. Максимальне значення 5,59% мало місце 30.01.2025 у фазі А комірки 18, що є близьким до стандартизованих 8% для гармонік струму. У загальному варіанті в середньому значення СКГС струму були між 0,54% у фазі В комірки 38 (28.01.2025) і 4,41% у фазі А комірки 38 (27.01.2025).

Відзначаємо, що середній СКГС струму 30.01.2025 у комірці 18 становив 2,86%, 2,66% та 2,55%, у фазах А, В і С, відповідно. Це вказує на системне зростання струмових гармонік у цій комірці. На це потрібно звернути увагу оперативному персоналу.

Також відзначаємо, що 05.02.2025 у ТПП-1 і ТПП-3 були однакові максимальні значення СКГС напруги 3,59%, що може вказувати на небажану якість роботи СЕП рудника. При цьому СКГС струму у той же день мали різні значення: 3,64% і 1,52% у фазі А ТПП-1 і ТПП-3, відповідно.

У комірці 38 також простежувалися показові результати. Якщо 27.01.2025 піковий СКГС струму був 5,06%, то наступного дня він становив 0,78%. Це вказує на те, що 27.01.2025 працював нелінійний споживач, як-то шахтна підймальна установка, скіпова або клітьова. Середньодобові значення СКГС струму в цій комірці були між 0,55% і 4,41%, що вказує на суттєве коливання цього ПЯЕ в аналізуємій СЕП.

Аналіз показав, що СКГС як за струмом, так і за напругою в рудничній електромережі 6 кВ не досягають стандартизованих гранично допустимих значень, що визначаються нормативною документацією для цього ПЯЕ. Але незважаючи на загальну задовільну якість роботи СЕП за СКГС, в окремих вузлах мало місце підвищення гармонік, що вказує на зниження ПЯЕ. Прикладом є вищезначені збільшення СКГС напруги у ТПП-1 та СКГС струму в комірці 18.

Щодо частоти як ПЯЕ, то найбільше відхилення від стандартизованого граничного значення 1%, якщо співставляти з іншими, мало місце на фазі С у комірці 18 30.01.2025. Воно мало значення 50,44 Гц (+0,88%), що є найвищим відхиленням у «плюс» від 50 Гц серед усіх зафіксованих вимірів. Найбільше відхилення у «мінус» було 03.02.25 на фазі В ТПП-3 49,84 Гц (-0,32%).

Якщо розглядати ТПП-1 і ТПП-3, найбільше частот вище 50 Гц зростала 05.02.2025 у їх фазах А, а саме 50,41 Гц (+0,82%). Значення частоти не перевищувало допустимого, проте було близько до межі. В цих же ТПП-1 і ТПП-3 на фазах В у той же день відхилення було 49,87 Гц (-0,26%). Тут якість частоти у стандартизованих межах. Проте падіння нижче 50 Гц свідчить про певну нестійкість роботи електромережі в цей день за цим ПЯЕ.

У комірці 38 частота відхилялася від стандартизованої значно менше. Так відхилення були не більше 50,13 Гц (+0,36%) 29.01.2025 і не менше 49,91 Гц (-0,18%) 28.01.2025.

Отже, частота в нормі.

Далі аналізуємо ПЯЕ виміряні приладом безпосередньо на рудничному електроприймачі 0,4 кВ – скреперній лебідці (табл. 2.4).

Дані щодо ПЯЕ в електромережі підземного рудника 0,4 кВ виявили низку критичних значень, які або наближаються до стандартизованих границь, або перевищують їх. Найбільш серйозні з них спостерігаються у відхиленнях напруги, які систематично перевищують норми. 05.02.2025 на фазі А мало місце найбільше падіння напруги -14,3%, що більше стандартизованих 10%. Те ж саме було у той же день на фазі В (-14,29%) і на фазі С (-14,21%). 06.02.2025, падіння дещо знизилося, проте все ще перевищувало стандартизовану межу: -13,93%, -13,27% та -13,19% на фазах А, В і С, відповідно. Тобто має місце системне перевантаження електромережі 0,4 кВ підземного рудника.

Щодо СКГС напруги, то тут ПЯЕ стабільніші. Найбільший СКГС напруги спостерігався 05.02.2025 на фазі С і дорівнював 2,88%, що суттєво

нижче граничних 8%. Середні значення СКГС напруги знаходилися між 0,41% і 0,74%. Отже якість напруги за цим показником задовільна.

Таблиця 2.4 – Добові значення показників якості електроенергії електромережі підземного рудника на напрузі 6 кВ

Дата	04.02.25	05.02.25	06.02.25
$\Delta U_A, \%$	-12,6	-14,3	-13,93
$\Delta U_B, \%$	-12,45	-14,29	-13,27
$\Delta U_C, \%$	-12,14	-14,21	-13,19
СКГС(U_A)			
max, %	0,71	2,03	1,03
сер, %	0,5	0,42	0,42
СКГС(U_B)			
max, %	0,68	2,58	1,05
сер, %	0,49	0,45	0,41
СКГС(U_C)			
max, %	1,003	2,88	1,19
сер, %	0,74	0,62	0,57
СКГС(I_A)			
max, %	1,83	2,1	2,12
сер, %	0,91	0,91	0,88
СКГС(I_B)			
max, %	2,75	2,83	2,56
сер, %	1,32	1,23	1,07
СКГС(I_C)			
max, %	2,21	2,12	1,94
сер, %	1,18	1,01	0,9
$f_{Amax}, \Gamma \Pi$	50,11	50,08	50,07
	(+0,22%)	(+0,16%)	(+0,14%)
$f_{Amin}, \Gamma \Pi$	49,9	49,91	49,92
	(-0,2%)	(-0,18%)	(-0,16%)
$f_{Bmax}, \Gamma \Pi$	50,11	50,08	50,07
	(+0,22%)	(+0,16%)	(+0,14%)
$f_{Bmin}, \Gamma \Pi$	49,9	49,91	49,92
	(-0,2%)	(-0,18%)	(-0,16%)
$f_{Cmax}, \Gamma \Pi$	50,11	50,08	50,07
	(+0,22%)	(+0,16%)	(+0,14%)
$f_{Cmin}, \Gamma \Pi$	49,9	49,91	49,92
	(-0,2%)	(-0,18%)	(-0,16%)

Для СКГС струму пікові значення також в межах норми. Так, найбільше значення спостерігалось на фазі В 05.02.2025 і дорівнювало 2,83%. У середньому СКГС струму був у межах між 0,88% і 1,32%. Тобто, зі за струмовими гармоніками ПЯЕ в нормі.

Щодо відхилень частоти, то вони були при всіх вимірах в межах допустимого стандартами 1%. Найбільше відхилення вище 50 Гц мало місце 04.02.2025 і становило 50,11 Гц (+0,22%). Нижче 50 Гц частота була також у той же день. Тоді вона дорівнювала 49,9 Гц (-0,2%). Така стабільність була і в інші дні: 05.02.2025 розмах коливань був у межах між -0,18% і +0,16%, а 06.02.2025 – між -0,16% і +0,14%. Отже, в цілому як частина електромережі підземного рудника з напругою 6 кВ, так і з напругою 0,4 кВ не мають проблем з якістю частоти.

Підсумовуючи встановлено, що головною проблемою в електромережі 0,4 кВ підземного рудника є падіння напруги, рівні і розмах яких перевищують стандартизовані граничні значення у середньому до 5%. Інші ПЯЕ, як-то СКГС струму і напруги або відхилення частоти, залишаються в допустимих стандартами межах, але вони теж мають підлягати постійному моніторингу. Для дотримання стабільного рівня напруги живлення електроприймачів підземного рудника при падіннях напруги необхідно провести аналіз технічного стану обладнання електромережі (трансформаторів, кабельних ліній електропередачі), рівні навантаження, а також розглянути можливість залучення спеціального обладнання для підтримання напруги живлення в СЕП на стандартизованих рівнях.

2.3 Аналітичні дослідження показників якості електроенергії

Структури, як і відповідні їм схеми електропостачання вітчизняних підземних рудників з видобутку залізної руди (на правах шахт), характеризуються своєю типовою розбудовою з незначним рівнем практичної варіативності [24, 26]. В попередньому підрозділі - 1.2 на рис. 1.1 та 1.2 пояснювальної записки наведено діючу однолінійну схему електропостачання

підземного рудника (шахта № 9, м. Кривий Ріг), а на рис. 2.4 – її відповідно спрощене структурне зображення.

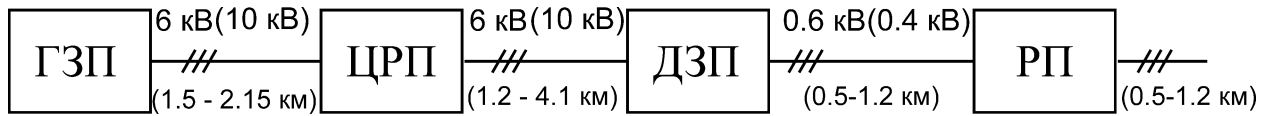


Рисунок 2.4 – Типова структура системи електропостачання підземного рудника (залізорудної шахти)

На ГЗП здійснюється трансформація енергії, котра транспортується з системи зовнішнього електропостачання (наприклад, величиною 35 кВ) до промислового рівня напруги (6 або 10 кВ). Фактично ГЗП є пограничною станцією між енергосистемою та системою електропостачання підприємства. ГЗП залізорудних шахт, як правило, розташуються на земній поверхні на технічно допустимій відстані від ствола. Від шин ГЗП через ЛЕП з напругою 6 кВ електроенергія подається вниз по стволу шахти до підземних ЦРП, яких може бути декілька. Далі йдуть через фідера ЛЕП до ДПП.

На ЦРП не здійснюється перетворення (трансформації) енергії, тільки розподіл високої напруги 6(10) кВ по подальшим споживачам.

Аналітика розрахунків падінь напруги на лініях системи електропостачання. Падіння напруги при проходженні номінальної потужності через силовий трансформатор розрахується [69, 70]:

– падінням напруги в лінії, що приєднана до первинної обмотки трансформатора

$$\Delta U_1 = \sqrt{3} \cdot I_{1\phi} \cdot (r_0 \cdot \cos \varphi + x_0 \cdot \sin \varphi) \cdot l_1; \quad (2.1)$$

– падінням напруги в лінії, що приєднана до вторинної обмотки трансформатора

$$\Delta U_2 = \sqrt{3} \cdot I_{2\phi} \cdot (r_0 \cdot \cos \varphi + x_0 \cdot \sin \varphi) \cdot l_2. \quad (2.2)$$

Для спрощення розрахунків, але без похибки, яка може суттєво вплинути на кінцевий результат розрахунку, будемо вважати, що $\cos \varphi$ та $\sin \varphi$ з виразів (2.1, 2.2) відповідають бажаному режиму компенсації реактивної

потужності (відповідно 0,9 та 0,44).

Результати розрахунків для більшої наочності зображено графічно, згрупувавши по окремим параметрам.

Для трансформатора $S=180$ кВА при значеннях первинної напруги 6 кВ та 10 кВ (рис. 2.5, 2.6), вторинної напруги 0,66 кВ та 0,4 кВ (рис. 2.7, 2.8).

$$S=180 \text{ кВА}, U_1=6 \text{ кВ та } U_1=10 \text{ кВ}$$

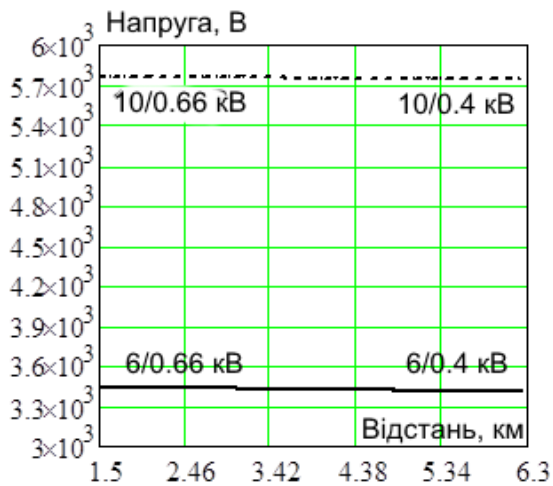


Рисунок 2.5 – Напруги у високовольтних лініях (ГЗП-ДЗП)



Рисунок 2.6 – Падіння напруги у високовольтних лініях (ГЗП-ДЗП)

$$S=180 \text{ кВА}, U_2=0,66 \text{ кВ та } U_2=0,4 \text{ кВ}$$

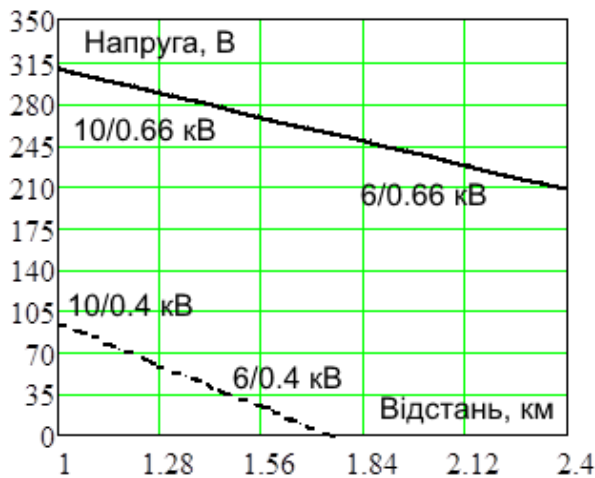


Рисунок 2.7 – Напруги у низьковольтних лініях (ГЗП-ДЗП)

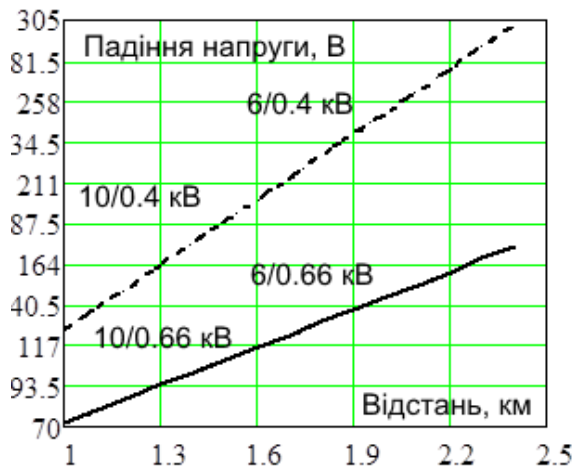


Рисунок 2.8 – Падіння напруги у низьковольтних лініях (ГЗП-ДЗП)

Для трансформатора $S=320$ кВА при значеннях первинної напруги 6 кВ та 10 кВ (рис. 2.9, 2.10), вторинної напруги 0,66 кВ та 0,4 кВ (рис. 2.11, 2.12).

$$S=320 \text{ кВА}, U_1= 6 \text{ кВ та } U_1= 10 \text{ кВ}$$

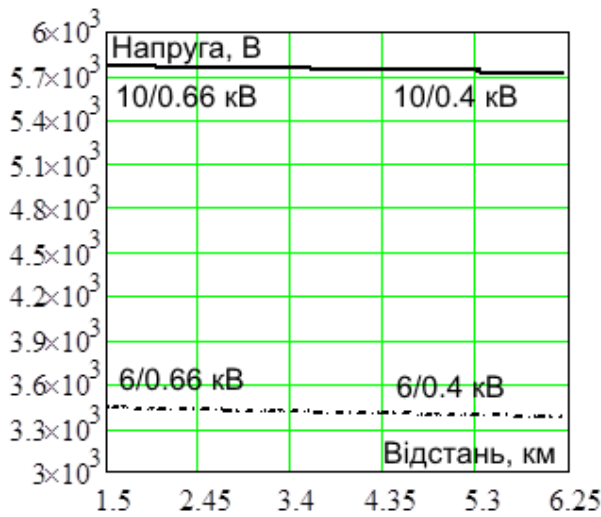


Рисунок 2.9 – Напруги у високовольтних лініях (ГЗП-ДЗП)

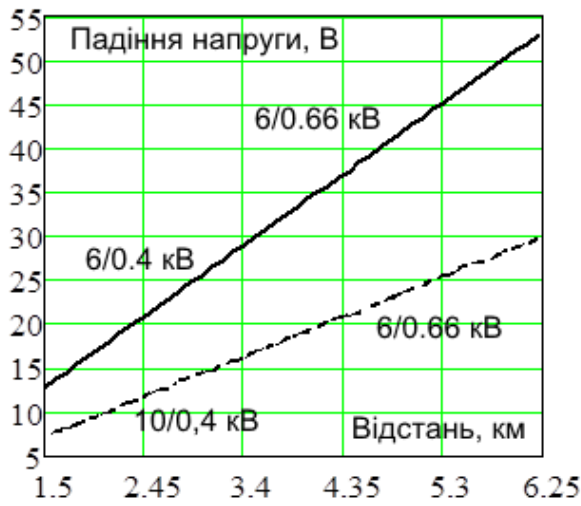


Рисунок 2.10 – Падіння напруги у високовольтних лініях (ГЗП-ДЗП)

$$S=320 \text{ кВА}, U_2= 0,66 \text{ кВ та } U_2= 0,4 \text{ кВ}$$

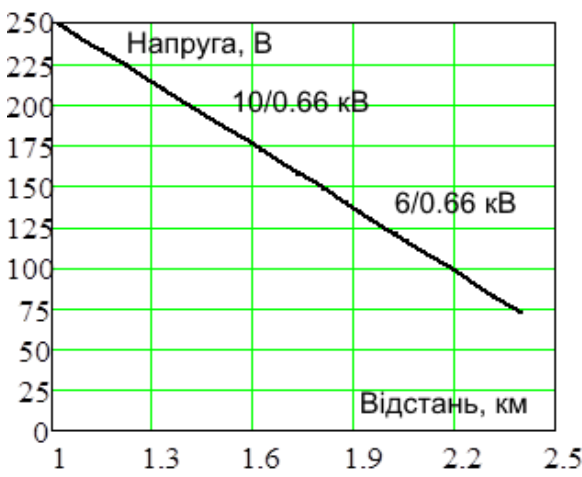


Рисунок 2.11 – Напруги у низьковольтних лініях (ГЗП-ДЗП)



Рисунок 2.12 – Падіння напруги у низьковольтних лініях (ГЗП-ДЗП)

Нижче наведені більш наочні графіки залежностей падіння напруги, в

яких зіставляються показники з трансформаторами різної потужності (рис. 2.13-2.17).

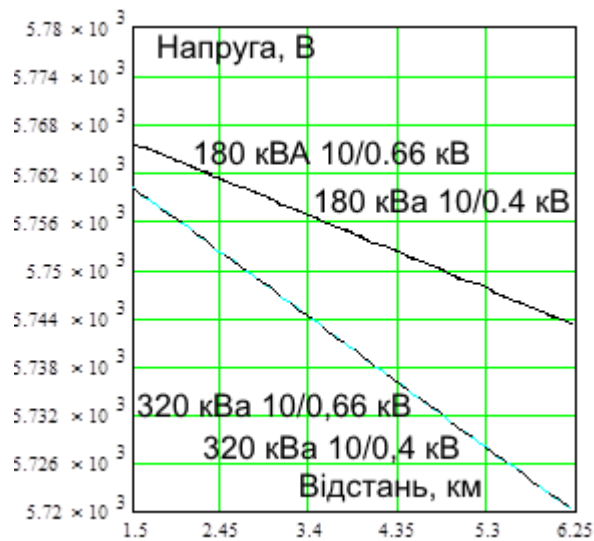


Рисунок 2.13 – Напруги у високовольтній лінії 10 кВ (ГЗП-ДЗП) – вид з більшою роздільною здатністю

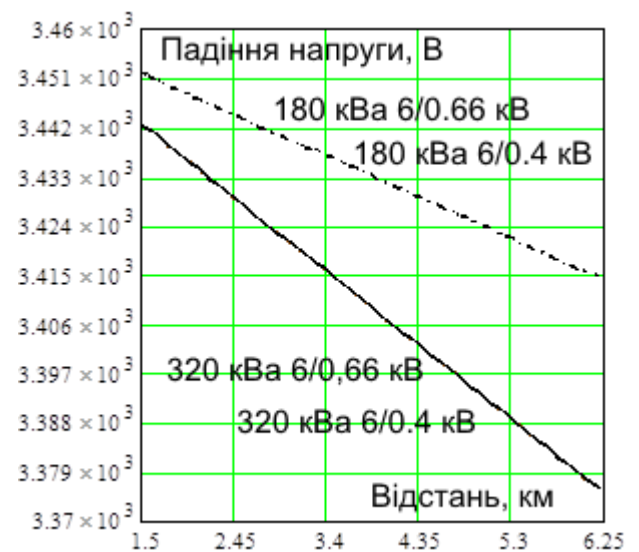


Рисунок 2.14 – Падіння напруги у високовольтній лінії 6 кВ (ГЗП-ДЗП) – вид з більшою роздільною здатністю

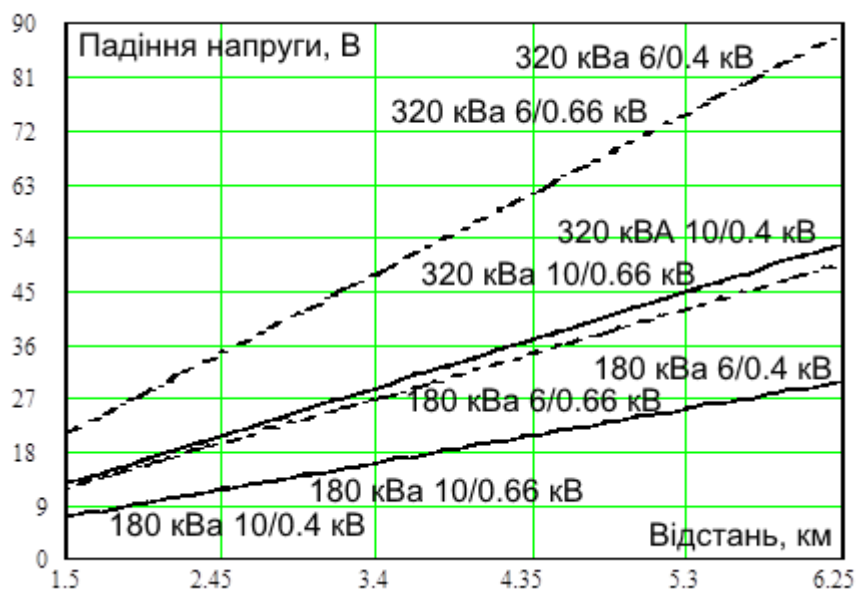


Рисунок 2.15 – Падіння напруги на лінії від ГЗП до ДЗП для усіх можливих варіантів

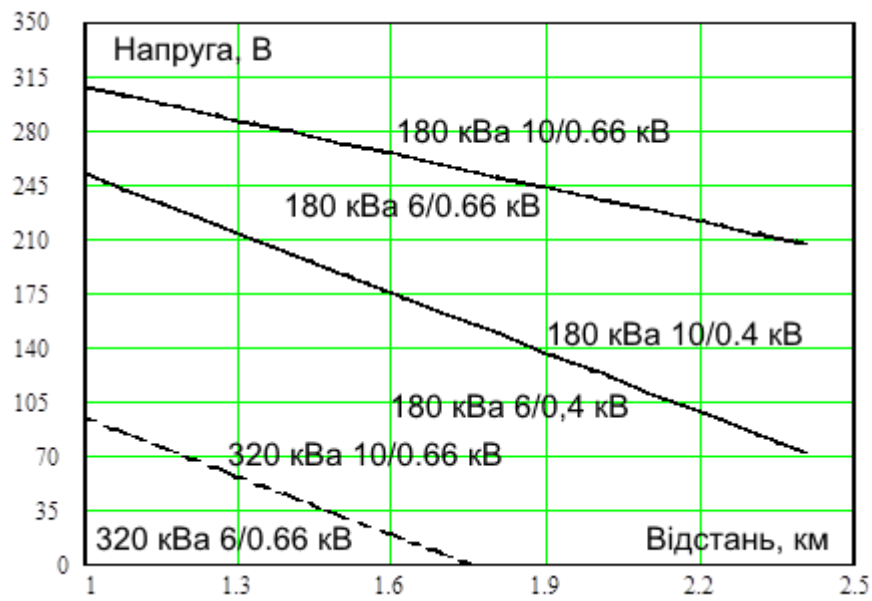


Рисунок 2.16 – Величина напруги на лінії від ДЗП до споживачів для усіх можливих варіантів

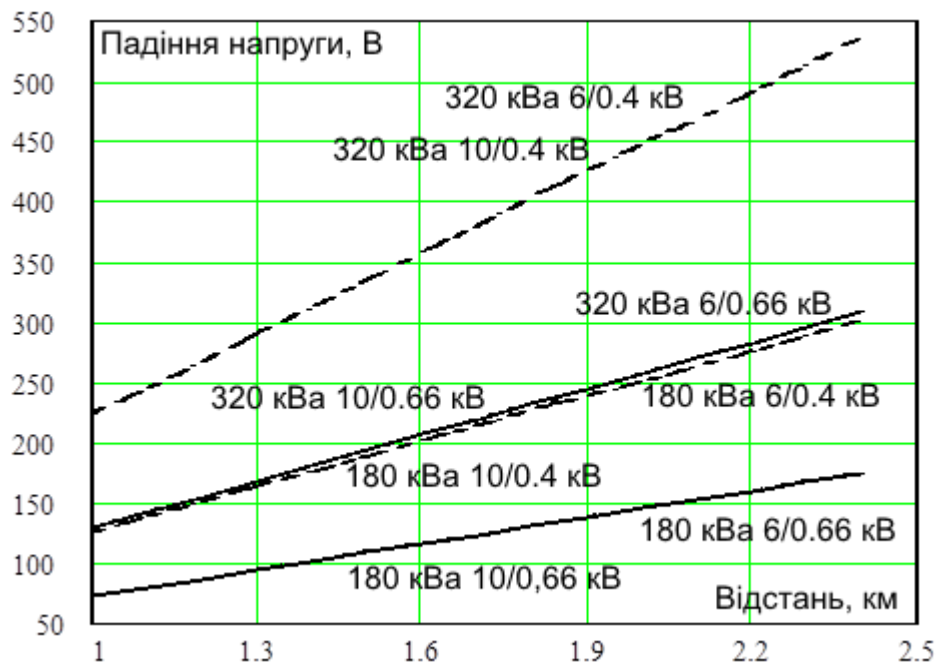


Рисунок 2.17 – Падіння напруги на лінії від ДЗП до споживачів для усіх можливих варіантів

Поєднання усіх отриманих результатів наведено рис. 2.18, 2.19.

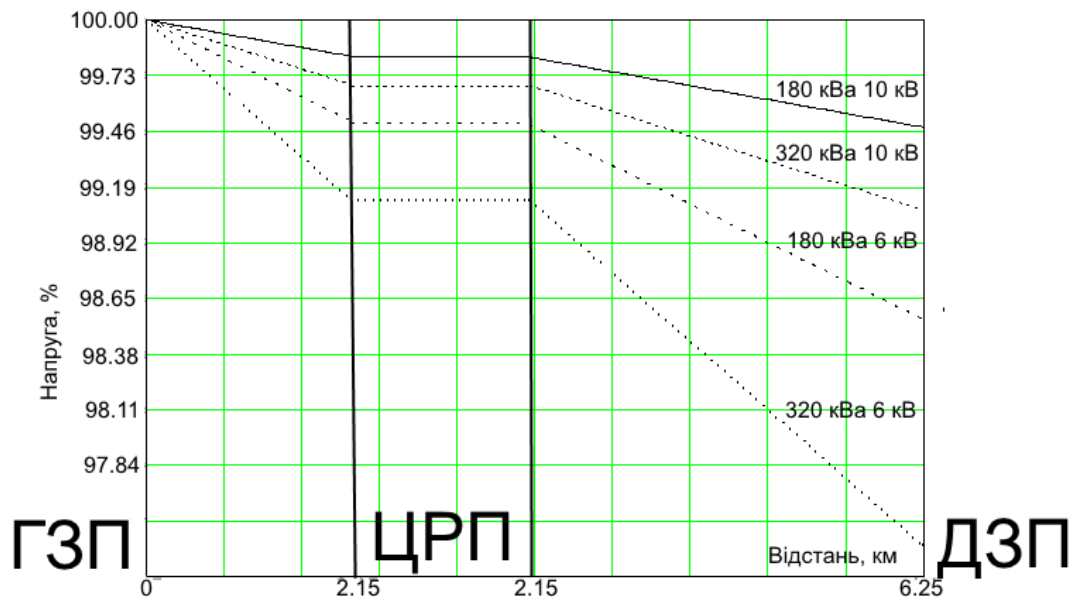


Рисунок 2.18 – Графіки змін рівнів напруги 6 (10) кВ системи електропостачання підземного рудника (шахта №9, м. Кривий Ріг)

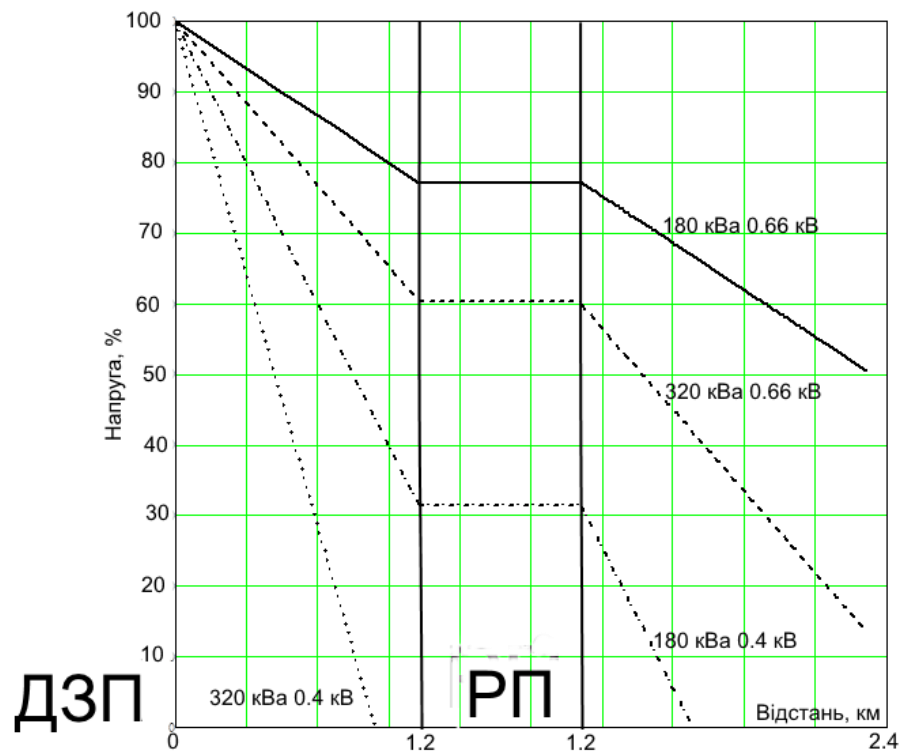


Рисунок 2.19 – Графіки змін значень напруги 0,4 (0,66) кВ по сегментах системи електропостачання підземного рудника (шахта №9, м. Кривий Ріг)

Як свідчать графіки рис. 2.5-2.19, падіння напруг з обох сторін трансформатора послідовно зростають при послідовній зміні наступних конфігурацій параметрів трансформатора ДПП: 180 кВА/10 кВ - 180 кВА/6 кВ - 320 кВА/10 кВ - 320 кВА/6 кВ. Іншими словами, падіння напруги зворотно пропорційне відношенню S_n/U_{1n} . Чим менше номінальна потужність трансформатора та вище його первинна та вторинна напруги, тим нижче падіння напруг в лініях трансформатора (рис. 2.20).



Рисунок 2.20 – Тривимірний розподіл падінь напруги в функції номінальної потужності трансформатора та рівнів його первинної напруги

Отримані теоретичні розрахунки являють собою відправні матеріали для оцінювання можливостей та розробки стартових позицій з розбудови тактики пошуку шляхів з підтримання ΔU в сегментах підземних СЕП гірничорудних підприємств.

Як доповнення до вищенаведених результатів аналізу рівнів відхилень ΔU та рівнів напруги живлень СЕП конкретного типового підземного рудника на рис. 2.21 наведено теоретичні обчислювання втрат ЕЕ в складових даних

електроенергетичних комплексів.

В межах даного рисунка зазначимо, що структура розподілу рівнів споживання ЕЕ на вихідних клемах ЦПП - 1045 горизонту та ЦІ 111 - 1135 метра досить симетрична по відповідним консолям СЕП - розкид складає по максимуму 12,5% (без різниці 1-го та 5-го споживача).

Проте, все ж, як свідчать дані (рис. 2.21) втрати ЕЕ як в окремих сегментах так і в СЕП взагалі, мають значні негативні рівні, що є слідством, в тому числі, низьких ЛЯЕ, і перш за все відхилень напруги А [/перш за все, про що було викладено попереду і про що буде викладено в подальшому, і, що в черговий раз підкреслює і додає конструктиву до актуальності та необхідності вирішення цієї задачі як проблеми.

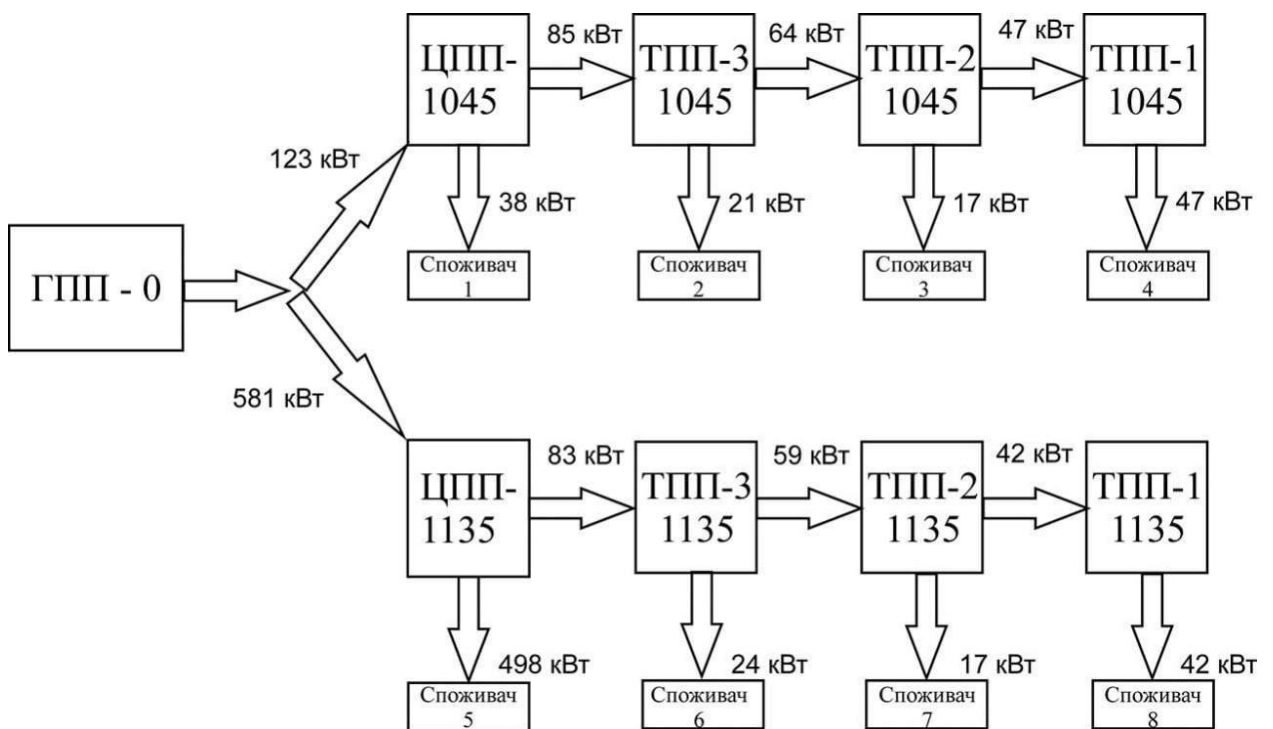


Рисунок 2.21 – Структура розподілу рівнів споживання електроенергії між складовими систем електропостачання типового реально функціонуючого горизонту підземного рудника (на правах шахти №9 ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг»)

2.4 Висновки до розділу 2

1. Експериментальні дослідження, котрі проводились в реальних умовах сучасного функціонування електроенергетичних комплексів: електропостачання – електроспоживання СЕП підземних рудників з видобутку залізної руди, для визначення ПЯЕ, підтвердили раніше встановлений факт, що окремі показники з цього комплексу, в числі котрих відхилення напруги (ΔU), не відповідають розрахунковим, оскільки в теорії складно і, навіть, неможливо враховувати всі фактори впливу на кожний окремо взятий локальний показник, а значить і на узагальнене оцінювання цієї формації. І якщо в частині електромережі з напругою 6 кВ, вони є близькими, але не досягали факту перетину порогу стандартизованого перевищення в 10%, то для електромережі 0,4 кВ вони є критичними і становили до -14,3%, що виходить за допустимі межі. Інші показники, як-то сумарний коефіцієнт гармонійних спотворень напруги та струму, відхилення частоти залишалися в межах стандартизованих значень. Максимальні сумарні коефіцієнти гармонійних спотворень напруги становили 3,59%, струму – 5,59%. Відхилення частоти не перевищували 1% (максимально +0,82%, мінімально -0,32%), що свідчить про гарну якість роботи системи електропостачання за частотою. Дослідження виявило необхідність стабілізації напруги живлення чутливого до відхилення напруги електроприймача в умовах підземного рудника.

2. Аналізуючи теоретично локальні зміни відхилення напруги ΔU в функції варіативності встановлених потужностей силових трансформаторів та рівнів їх вхідних - вихідних напруг у внутрішніх електромережах рудників, встановлено наступне:

- чим вище рівень потужності силового трансформатора тим менше втрати напруги в складових консолей системи електропостачання;
- внутрішніх СЕП рудників при однакових напругах живлення, тим вище втрати напруги;
- незалежно від потужності, та рівнів первинної і вторинної напруги

трансформатору, чим нижче напруга трансформатора – тим вище рівень втрат напруги в лініях, при інших рівних умовах;

– по вторинній стороні трансформаторів, що стосується напруг, то при заявлених довжинах ліній ситуація драматична – найліпші показники при використанні менш потужного трансформатору 180 кВА з найвищою вторинною напругою 660 В (19 %), що майже у два рази більш припустимої величини 10 %. Тобто виникає необхідність обмежень довжини ЛЕП на стороні вторинної напруги трансформаторів. Так, максимально допустима довжина для трансформатора 180 кВА вторинною напругою 660 В – 0,52 км, а вторинною напругою 380 В – 0,174 км. У трансформатора більшої потужності 320 кВА, природно, ситуація є гіршою, там розрахункові довжини 0,09 км для 380 В, та 0,295 км для 660 В. Це не реалізуємо в практиці функціонування СЕП гірничих підприємств і, де, реальні протяжності вищезгаданих консолів ЛЕП значно перевищують теоретично обґрунтовані вищенаведені межі, що провокує потенційну негативність зростання показника відхилення напруги (ΔU) від стандартизованого значення.

3. Для отримання кінцевого рішення – підтримання на стандартизованих рівнях напруги живлення в процесі її транспортування по внутрішнім ЛЕП, то на клемах конкретних споживачів електроенергії, при загальній стохастичності цього узагальнено-агрегативного процесу споживання ЕЕ, слід враховувати факт присутності в цій структурі складових не хаотичного, а постійно-циклічного характеру поведінки.

Необхідним в такій ситуації вбачається пошук сучасних заходів з недопущення як відхилень напруги, так і розмахів її змін, не відхиляючи і інших ПЯЕ аналізованого комплексу від стандартизованих значень.

РОЗДІЛ 3

ЯКІСТЬ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В ПАРАДИГМІ ОЧІКУЄМИХ УПРАВЛІНСЬКИХ ДІЙ

3.1 Моделювання якості електропостачання в умовах споживання електроенергії приймачами підземних рудників

Якість електричної енергії – стандартизований комплекс ПЯЕ, як і якість електропостачання – не стандартизоване визначення, являють собою взаємопов’язані та взаємовпливові споріднені поняття, котрі формують вхідні параметри для ефективної роботи як конкретних споживачів ЕЕ так і відповідних електроенергетичних комплексів в цілому.

Йдучи в межах логістики розбудови варіанту структури пошуку: визначення стану – визначення та оцінювання факторів впливу – розробка системи керування ПЯЕ в межах допустимих стандартних рівнів, доцільно розробити відповідну дослідницьку модель, котра базуючись на реальних вхідних параметрах, які, в свою чергу, базуються на відповідних експериментальних замірах в умовах діючих підземних гірничих виробництв, дасть можливість відбудувати логіку алгоритму керування цим процесом з послідуною логістикою розробки відповідної СК.

Базуючись на встановленому факті [27, 29, 30, 70], що коливання рівнів споживання ЕЕ в умовах підземних залізвидобувних рудників носить стохастичний в часі характер, котрий відповідно віддзеркалюється на коливаннях параметрів ПЯЕ, в тому числі на рівнях відхилень напруги в СЕП на клемах приймачів ЕЕ, для подальшого пошуку, у відповідності з структурою формату досягнення мети – керованості цим процесом, обґрунтованим виглядає рішення з залученням до цього, на тлі існуючих варіантів, одного з сучасних та достатньо дієвих для якісного проведення аналізу досліджуємих процесів, – апарату математичного моделювання на основі «задач викидів» [71-74].

Розглянемо процес комплексності споживання ЕЕ $W(t)$ як є випадкову функцію, тобто таку функцію свого аргументу, значення якої при будь-якому значенні часу t є випадковою величиною. Якщо аргумент випадкової функції t набуває будь-яких значень у заданому інтервалі, то випадкова функція буде також називатися випадковим процесом.

Процес $W(t)$ називається безперервним по ймовірності, якщо за будь-якого $\varepsilon (\varepsilon > 0)$ має місце

$$\lim_{\Delta \rightarrow 0} P\{\|W(t+\Delta)-W(t)\| \geq \varepsilon\} = 0.$$

$$\Delta \rightarrow 0$$

Аналізуючи випадкову функцію $W(t)$ і припустимо, що для її дослідження проведено n незалежних дослідів. У кожному досліді буде отримано реалізацію випадкової функції $W(t)$. Випадкову функцію можна вважати заданою, якщо задані всі багатовимірні закони розподілу $f(x_1, x_2, \dots, x_n | t_1, t_2, \dots, t_n)$ для будь-яких значень $t_1, t_2, \dots, t_n$ із області зміни аргументу t . Однак побудова багатовимірного закону розподілу незручна, оскільки є громіздкою. Тому на практиці, як правило, замість самих багатовимірних законів розподілу обмежуються завданням відповідних числових параметрів цих законів. В якості таких параметрів найбільш дієвими є початкові, або центральні моменти різних порядків. З нескінченного числа моментів найбільш важливими з точки зору характеристики випадкової функції є моменти першого і другого порядку. Момент першого порядку, який визначається формулою [75-77]

$$m_1 = M[W(t_1)], \quad (3.1)$$

є математичним очікуванням ординати випадкової функції у довільний час. Математичне очікування (3.1) залежить від значення часу показує середнє значення $W(t)$, тому надалі позначається так

$$\bar{w}(t) = M[W(t)]. \quad (3.2)$$

Функція (3.2) не є випадковою і повністю визначається одномірною щільністю ймовірності

$$\bar{w}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} wf(w|t)dw. \quad (3.3)$$

Початкові моменти другого порядку можуть бути двох типів: моменти другого порядку однієї з ординат випадкової функції, що визначаються формулою

$$m_2 = M[W^2(t_1)], \quad (3.4)$$

та змішані моменти другого порядку

$$m_{1,1} = M[W(t_1)W(t_2)]. \quad (3.5)$$

Замість початкових моментів частіше застосовують центральні моменти другого порядку, що визначаються рівностями

$$D[W(t)] = M\{[W(t) - \bar{w}(t)]^2\}, \quad (3.6)$$

$$K(t_1, t_2) = M\{[W(t_1) - \bar{w}(t_1)][W(t_2) - \bar{w}(t_2)]\}. \quad (3.7)$$

Згідно (3.6) і (3.7), $D[W(t)]$ є дисперсією випадкової величини $W(t)$, а $K(t_1, t_2)$ – кореляційною функцією.

Явні вирази для математичного очікування для дисперсії (3.6) і кореляційної функції (3.7) записуються у вигляді

$$D[W(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} [w - \bar{w}(t)]^2 f(w|t)dw, \quad (3.8)$$

$$K(t_1, t_2) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} [w_1 - \bar{w}(t_1)][w_2 - \bar{w}(t_2)] f(w_1, w_2 | t_1, t_2) dw_1 dw_2. \quad (3.9)$$

Розділ теорії випадкових функцій, що оперує лише моментами перших двох порядків, називається кореляційною теорією випадкових функцій [78-80]. При вирішенні задачі про викиди використаємо кореляційну теорію випадкових функцій.

Найбільш важливим властивістю випадкової функції, що знайшло застосування під час вирішення завдання про викиди, є незалежність властивостей випадкової функції від початку відліку часу. Відповідно до цього вводиться поняття стаціонарних випадкових функцій. Для стаціонарних

випадкових функцій всі багатомірні закони розподілу залежать не тільки від взаємного розташування моментів часу, але і з самих значень цих величин. Тобто повинно виконуватися співвідношення

$$f(w_1, w_2, \dots, w_n | t_1, t_2, \dots, t_n) = f(w_1, w_2, \dots, w_n | t_1 + t_0, t_2 + t_0, \dots, t_n + t_0), \quad (3.10)$$

де t_0 – будь-яке число.

В окремому випадку, при $n=1$ і $n=2$, вважаючи $t_0 = -t_1$ згідно (3.10), будемо мати

$$f(w_1 | t_1) = f(w_1 | 0) = f(w_1), \quad (3.11)$$

$$f(w_1, w_2 | t_1, t_2) = f(w_1, w_2 | 0, t_2 - t_1) = f(w_1, w_2 | t_2 - t_1). \quad (3.12)$$

Підставивши (3.11) і (3.12) в (3.3), (3.8) і (3.9), отримаємо

$$\bar{w}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} w f(w) dw = \bar{w}, \quad (3.13)$$

$$D[W(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} (w - \bar{w})^2 f(w) dw = D(W), \quad (3.14)$$

$$K(t_1, t_2) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} [w_1 - \bar{w}][w_2 - \bar{w}] f(w_1, w_2 | t_2 - t_1) dw_1 dw_2 = K(t_2 - t_1). \quad (3.15)$$

Якщо умови (3.13), (3.14) і (3.15) виконуються, то випадкова функція $W(t)$ називатиметься стаціонарною в широкому сенсі цього питання.

Іншою ознакою, яка може бути покладена в класифікацію випадкових функцій, є вид законів розподілу її ординат. Найчастіше зустрічається нормальний закон розподілу (закон Гауса) [81-84]. У разі однієї випадкової величини нормальний закон розподілу набуває вигляду

$$f(w) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(w-\bar{w})^2}{2\sigma^2}}, \quad (3.16)$$

де $\sigma^2 = D(W)$.

Для інтегральної функції розподілу згідно (3.16) має місце формула

$$F(w) = \int_{-\infty}^w f(w) dw = \frac{1}{2} \left[1 + \Phi \left(\frac{w - \bar{w}}{\sigma} \right) \right], \quad (3.17)$$

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

Дослідження нормальних випадкових функцій полегшується тим, що для визначення закону розподілу системи нормальних величин досить знати лише їхні математичні очікування та кореляційні функції.

Випадковий процес $W(t)$ є диференційованим, якщо існує межа

$$\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{W(t + \varepsilon) - W(t)}{\varepsilon} = \frac{dW(t)}{dt}, \quad (3.18)$$

яка називається похідною процесу $W(t)$ в точці t .

Для того щоб випадкова функція мала похідну достатньо існування другої похідної від кореляційної функції при рівних значеннях її аргументів. Для стаціонарних випадкових функцій виконується

$$K(t_1, t_2) = K(t_2 - t_1) = K(\tau), \quad (3.19)$$

тому, згідно (3.19),

$$\frac{\partial^2 K(t_2 - t_1)}{\partial t_1 \partial t_2} = \left|_{t_1=t_2=t} \right. = - \frac{d^2 K(\tau)}{d\tau^2} \Big|_{\tau=0}. \quad (3.20)$$

Зазначимо, що кореляційна функція похідної випадкової функції дорівнює другій змішаній частинній похідній від кореляційної функції випадкової функції, що диференціюється, тобто

$$K_v(t_1, t_2) = \frac{\partial^2 K_w(t_1, t_2)}{\partial t_1 \partial t_2}. \quad (3.21)$$

У тому випадку, коли випадкова функція стаціонарна $W(t)$ замість (3.21) матиме місце

$$K_v(\tau) = - \frac{d^2 K_w(\tau)}{d\tau^2}. \quad (3.22)$$

Після короткого ознайомлення з випадковими функціями та їх властивостями розглянемо вирішення завдання про викиди при дослідженні ПЯЕ на гірничорудних підприємствах.

Нехай $W(t)$ – рівні відхилень ПЯЕ, що є диференційованим стаціонарним випадковим процесом; β – значення потужності споживання ЕЕ $W(t)$, викиди які досліджуються. Будемо називати перетин процесом $W(t)$ заданого рівня з додатною похідною (знизу вгору) додатнім викидом, зверху вниз – від’ємним викидом. Обмежуючись додатними викидами, поставимо завдання визначити їх як ймовірнісні характеристики:

- числові характеристики випадкового числа викидів за інтервал часу T ;
- числові характеристики випадкового часу в інтервалі T , протягом якого $W(t)$ перевищує заданий рівень β .

Знайдемо математичне очікування кількості додатних викидів за інтервал часу T . Визначимо ймовірність того, що в нескінченно малий проміжок часу dt , наступний моментом часу t , відбудеться викид. Для того, щоб за вказаних умов мав місце викид, потрібно, щоб здійснилися дві події: по-перше, в момент часу t ордината випадкової функції має бути менше β , тобто

$$W(t) < \beta, \quad (3.23)$$

і, по-друге, в момент часу $t + dt$ ордината випадкової функції має бути більше β , тобто

$$W(t + dt) > \beta. \quad (3.24)$$

Отже, можливість викиду в інтервалі часу dt може бути записана так

$$P[W(t) < \beta; W(t + dt) > \beta]. \quad (3.25)$$

Користуючись умовою диференційності випадкової функції $W(t)$, нерівність (3.25), що накладає обмеження на ординати випадкової функції $W(t)$ у двох суміжних точках, можна замінити нерівностями, накладеними на ординату випадкової функції $W(t)$ та її похідну $V(t)$ в одній точці. Дійсно, враховуючи малість інтервалу часу dt з точністю до нескінченно малих другого порядку, отримаємо

$$W(t + dt) = W(t) + V(t)dt, \quad V(t) = \frac{dW(t)}{dt}. \quad (3.26)$$

Отже, нерівність

$$W(t + dt) > \beta \quad (3.27)$$

еквівалентна нерівності

$$W(t) + V(t)dt > \beta,$$

або

$$\beta - V(t)dt < W(t). \quad (3.28)$$

Замість двох нерівностей (3.23) і (3.24), які зумовлюють в (3.25) ймовірність наявності викиду в інтервалі часу dt , можна написати одну подвійну нерівність

$$\beta - V(t)dt < W(t) < \beta, \quad (V(t) > 0). \quad (3.29)$$

Для обчислення ймовірності нерівності (3.29) необхідно ввести двовимірний закон розподілу ординати випадкової функції $W(t)$ та її похідної $V(t)$ в той самий момент часу t

$$f(w, v|t). \quad (3.30)$$

Тоді для ймовірності викиду отримаємо

$$P[\beta - V(t)dt < W(t) < \beta] = \int_0^\infty \int_{\beta - V(t)dt}^\beta f(w, v|t) dw dv, \quad (3.31)$$

де межі інтегрування охоплюють усі значення $W(t)$ і $V(t)$, що задовольняють нерівності (3.29). Внутрішній інтеграл (3.31) може бути обчислений, оскільки у нього межі інтегрування відрізняються на нескінченно малу величину $v \cdot dt$, і, користуючись теоремою про середнє, отримаємо

$$\int_{\beta - vdt}^\beta f(w, v|t) dw = dt \cdot v \cdot f(\beta, v|t). \quad (3.32)$$

Підстановка (3.32) в (3.31) дає

$$P[\beta - V(t)dt < W(t) < \beta] = dt \int_0^\infty f(\beta, v|t) v dv. \quad (3.33)$$

Формула (3.33) показує, що можливість викиду протягом нескінченно малого інтервалу часу dt пропорційна величині цього інтервалу. Тому доцільно ввести поняття часової щільності для ймовірності викиду, позначивши $p(\beta|t)$ ймовірність викиду за рівень β у момент часу t , розраховану на одиницю часу, тобто поклавши

$$P[\beta - V(t)dt < W(t) < \beta] = p(\beta|t)dt. \quad (3.34)$$

Порівняння (3.34) з (3.33) дає для щільності ймовірності $p(\beta|t)$ остаточний вираз

$$p(\beta|t) = \int_0^{\infty} f(\beta, v|t) v dv. \quad (3.35)$$

Аналогічно може бути підрахована часова щільність ймовірності $p'(\beta|t)$ перетину випадковою функцією рівня β зверху донизу. Повторюючи наведені вище міркування отримаємо

$$p'(\beta|t) = - \int_{-\infty}^0 f(\beta, v|t) v dv. \quad (3.36)$$

Складаючи та віднімаючи (3.35) та (3.36), отримаємо

$$p(\beta|t) + p'(\beta|t) = \int_{-\infty}^{\infty} f(\beta, v|t) |v| dv, \quad (3.37)$$

$$p(\beta|t) - p'(\beta|t) = \int_{-\infty}^{\infty} f(\beta, v|t) v dv. \quad (3.38)$$

Користуючись (3.35), можна отримати для проміжку часу T середній час перебування випадкової функції вище заданого рівня. Дійсно, розіб'ємо проміжок часу T на n рівних за величиною малих інтервалів dt_j , кожен з яких розташований поблизу моменту часу t_j ($j=1, 2, \dots, n$). Ймовірність того, що ординати випадкової функції $W(t_j)$ буде вищими за заданий рівень β , визначається формулою

$$P(W(t_j) > \beta) = \int_{\beta}^{\infty} f(w|t_j) dw. \quad (3.39)$$

Вважаємо, що величини інтервалів dt_j настільки малі, щоб можна було при підрахунку сумарного часу перебування випадкової функції $W(t_j)$ вище заданого рівня β знехтувати випадками, коли всередині інтервалу функція $[W(t_j) - \beta]$ змінює знак. Введемо до розгляду систему випадкових величин Δ_j , кожна з яких дорівнює відповідному інтервалу dt_j або 0 в залежності від того, чи буде в цьому інтервалі випадкова функція $W(t_j)$ більша або менша β . Тоді загальний час перебування T_β випадкової функції $W(t)$ вище заданого рівня β дорівнює сумі Δ_j , тобто

$$T_\beta = \sum_{j=1}^n \Delta_j. \quad (3.40)$$

Для визначення середнього часу перебування $\bar{t}_\beta$ випадкової функції $W(t)$ вище за заданий рівень β протягом часу T необхідно знайти математичне очікування від обох частин рівності (3.40). Застосовуючи теорему про математичне очікування суми, знаходимо

$$\bar{t}_\beta = \sum_{j=1}^n M[\Delta_j]. \quad (3.41)$$

Випадкова величина Δ_j приймає тільки два значення (dt_j і 0), отже, її математичне очікування дорівнює

$$M[\Delta_j] = dt_j \int_{\beta}^{\infty} f(w|t_j) dw. \quad (3.42)$$

Підставляючи (3.42) в (3.41) і переходячи до межі при $n \rightarrow \infty$ замість суми отримаємо інтеграл, а для середнього часу перебування випадкової функції $W(t)$ вище рівня β , розрахованого для проміжку часу T , отримаємо

$$\bar{t}_\beta = \int_0^T \int_{\beta}^{\infty} f(w|t) dw dt. \quad (3.43)$$

На практиці представляє інтерес середній час перебування випадкової функції вище заданого рівня протягом одного викиду. Для визначення цього

середнього часу $\bar{\tau}$ час (3.43) необхідно розділити на середню кількість викидів $\bar{n}_\beta$, що мали місце протягом часу T . Для визначення середньої кількості викидів $\bar{n}_\beta$ необхідно розбити проміжок T на n рівних інтервалів dt_j і ввести допоміжні величини N_j , кожна з яких дорівнює одиниці, якщо всередині відповідного інтервалу мав місце викид (внаслідок малості довжини інтервалів dt_j з можливістю виникнення більше одного викиду можна не враховувати), і нулю – у протилежному випадку. Тоді повне число викидів N_β за проміжок часу T дорівнюватиме сумі величин N_j

$$N_\beta = \sum_{j=1}^n N_j. \quad (3.44)$$

Знаходячи математичне очікування обох частин рівності (3.44) і враховуючи, що математичне очікування кожної з величин N_j чисельно дорівнює ймовірності викиду в j -му інтервалі,

$$M[N_j] = p(\beta|t_j)dt_j$$

тобто буде мати місце

$$\bar{n}_\beta = \sum_{j=1}^n p(\beta|t_j)dt_j. \quad (3.45)$$

Збільшуючи кількість інтервалів dt_j до нескінченності і замінюючи суму на інтеграл та підставляючи (3.35), отримаємо

$$\bar{n}_\beta = \int_0^T \int_\beta^\infty v f(\beta, v|t) dv dt. \quad (3.46)$$

Поділ (3.43) на (3.46) дає шукану середню тривалість викиду

$$\bar{\tau}_\beta = \frac{\bar{t}_\beta}{\bar{n}_\beta} = \frac{\int_0^T \int_\beta^\infty f(w|t) dw dt}{\int_0^T \int_\beta^\infty v f(\beta, v|t) dv dt}. \quad (3.47)$$

Отримані формули мають найбільший інтерес для стаціонарних процесів, тому що для процесів, що встановилися за часом, середня тривалість

викиду наочне значення. Для стаціонарних процесів ці формули спрощуються, оскільки щільність розподілу ординат випадкової функції $f(w|t)$ та щільність розподілу ординат та швидкостей $f(w, v|t)$ не залежать від часу. Позначаючи ці щільності розподілу через $f(w)$ і $f(w, v)$ відзначаємо, що інтегрування за часом зводиться до множення на проміжок часу T і для середнього часу перебування стаціонарної випадкової функції $W(t)$ вище заданого рівня β протягом часу T (3.43), середньої кількості викидів за цей же проміжок часу T (3.46) та середньої тривалості викиду (3.47) отримаємо формули

$$\bar{t}_\beta = T \int_\beta^\infty f(w) dw, \quad (3.48)$$

$$\bar{n}_\beta = T \int_\beta^\infty v f(\beta, v) dv dt, \quad (3.49)$$

$$\bar{\tau}_\beta = \frac{\int_\beta^\infty f(w) dw}{\int_\beta^\infty v f(\beta, v) dv}. \quad (3.50)$$

Для стаціонарних процесів можна запровадити поняття середньої кількості викидів за одиницю часу [71, 72, 80-82]

$$\bar{v}_\beta = \frac{\bar{n}_\beta}{T}. \quad (3.51)$$

Враховуючи (3.49), формула (3.51) приймає вигляд

$$\bar{v}_\beta = \int_\beta^\infty v f(\beta, v) dv dt. \quad (3.52)$$

Оскільки у всі виведені вище формули входять щільності ймовірності, то для отримання числових результатів необхідно мати ці щільності.

Для нормального процесу, найважливішого з практичної точки зору, можуть бути отримані досить прості розрахункові формули.

Для нормального стаціонарного процесу закон розподілу ординат випадкової функції однозначно виражається через математичне очікування випадкової функції $\bar{w}$ та її дисперсію

$$\sigma_w^2 = K_w(0), \quad (3.53)$$

оскільки

$$f(w) = \frac{1}{\sigma_w \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(w-\bar{w})^2}{2\sigma_w^2}}. \quad (3.54)$$

Швидкість зміни ординати випадкової функції та ордината випадкової функції для того ж моменту часу є некорельованими випадковими величинами, а для нормального випадкового процесу ще й незалежними величинами. Тому двовимірна щільність розподілу ймовірності $f(w, v)$ розпадається на добуток нормальних щільностей розподілу для W і V , можна написати

$$f(w, v) = \frac{1}{\sigma_w \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(w-\bar{w})^2}{2\sigma_w^2}} \cdot \frac{1}{\sigma_v \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{v^2}{2\sigma_v^2}}. \quad (3.55)$$

Дисперсія швидкості зміни ординати випадкової функції дорівнює

$$\sigma_v^2 = -\frac{d^2}{d\tau^2} K_w(\tau) \Big|_{\tau=0}. \quad (3.56)$$

Математичне очікування швидкості зміни ординати випадкової функції внаслідок стаціонарності випадкового процесу дорівнює нулю, тобто

$$\bar{v} = 0.$$

Підстановка (3.55) в (3.52) дає для середньої кількості викидів в одиницю часу $\bar{v}_\beta$, або для тимчасової щільності ймовірності $p(\beta|t) = p(\beta)$

$$\bar{v}_\beta = p(\beta) = \frac{\sigma_v}{2\pi\sigma_w} e^{-\frac{(\beta-\bar{w})^2}{2\sigma_w^2}}. \quad (3.57)$$

Аналогічно, після підстановки в (3.50) будемо мати

$$\bar{\tau}_\beta = \pi \frac{\sigma_w}{\sigma_v} e^{-\frac{(\beta-\bar{w})^2}{2\sigma_w^2}} \left[1 - \Phi\left(\frac{\beta - \bar{w}}{\sigma_w}\right) \right], \quad (3.58)$$

де $\Phi(w)$ – інтегральна функція Лапласа.

Покажемо, як знайти середню електроенергію $\bar{e}$, обмежену реалізацією випадковою функцією вище за заданий рівень β під час викиду, вважаючи випадкову функцію $W(t)$ стаціонарною. Ведемо для цієї мети допоміжну функцію, яка визначається рівністю

$$I(w) = \begin{cases} 1, & w > 0 \\ \frac{1}{2}, & w = 0. \\ 0, & w < 0 \end{cases} \quad (3.59)$$

Тоді електроенергія всіх викидів E , що мали місце протягом часу T , може бути представлена так

$$E = \int_0^T I[W(t) - \beta] W(t) dt - \beta \cdot \bar{\tau}_\beta \cdot \bar{v}_\beta \cdot T. \quad (3.60)$$

Перший множник у підінтегральному вираженні (3.60) протягом викиду дорівнює одиниці і дорівнює нулю у всіх інших випадках. Виразимо явно функцію (3.59). Для цього користуємося інтегралом Діріхле

$$\frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\sin uw}{u} du = \begin{cases} 1, & w > 0 \\ \frac{1}{2}, & w = 0. \\ 0, & w < 0 \end{cases}.$$

Якщо розглядати інтеграл

$$\frac{1}{\pi \cdot i} \int_{-\infty}^{\infty} e^{i \cdot u \cdot w} \frac{du}{u}$$

у сенсі його головного значення, то

$$\frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\sin uw}{u} du = \frac{1}{\pi \cdot i} \int_{-\infty}^{\infty} e^{i \cdot u \cdot w} \frac{du}{u}. \quad (3.61)$$

Справді, оскільки у (3.61) інтеграл розуміється у сенсі головного значення, то

$$\frac{1}{\pi \cdot i} \int_{-\infty}^{\infty} e^{i \cdot u \cdot w} \frac{du}{u} = \frac{1}{\pi \cdot i} \lim_{\substack{\varepsilon \rightarrow 0 \\ L \rightarrow \infty}} \left\{ \int_{-L}^{-\varepsilon} e^{i \cdot u \cdot w} \frac{du}{u} + \int_{\varepsilon}^L e^{i \cdot u \cdot w} \frac{du}{u} \right\},$$

де ε і L – додатні величини, які прагнуть до своїх меж незалежно одне від одного. Представимо

$$e^{i \cdot u \cdot w} = \cos uw + i \cdot \sin uw.$$

Оскільки

$$\lim_{\substack{\varepsilon \rightarrow 0 \\ L \rightarrow \infty}} \left\{ \int_{-L}^{-\varepsilon} \cos uw \frac{du}{u} + \int_{\varepsilon}^L \cos uw \frac{du}{u} \right\} = 0,$$

то

$$\frac{1}{\pi \cdot i} \int_{-\infty}^{\infty} e^{i \cdot u \cdot w} \frac{du}{u} = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\sin uw}{u} du,$$

тобто формула (3.61) має місце.

Враховуючи (3.61), функцію $I(w)$ можна представити у вигляді

$$I(w) = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{1}{\pi \cdot i} \int_{-\infty}^{\infty} e^{i \cdot u \cdot w} \frac{du}{u} \right]. \quad (3.62)$$

Підставляючи (3.62) в (3.60), отримаємо

$$E = \frac{1}{2} \int_0^T W(t) dt + \frac{1}{2\pi i} \int_0^T \int_{-\infty}^{\infty} e^{iu[W(t)-\beta]} W(t) \frac{du}{u} dt - \beta \cdot \bar{\tau}_{\beta} \cdot \bar{v}_{\beta} \cdot T. \quad (3.63)$$

Застосуємо до обох частин (3.63) операцію математичного очікування

$$M[E] = M \left[\frac{1}{2} \int_0^T W(t) dt + \frac{1}{2\pi i} \int_0^T \int_{-\infty}^{\infty} e^{iu[W(t)-\beta]} W(t) \frac{du}{u} dt - \beta \cdot \bar{\tau}_{\beta} \cdot \bar{v}_{\beta} \cdot T \right]. \quad (3.64)$$

В результаті будемо мати, для лівої частини рівності (3.64)

$$M[E] = \bar{s} \cdot \bar{v}_{\beta} \cdot T - \beta \cdot \bar{\tau}_{\beta} \cdot \bar{v}_{\beta} \cdot T.$$

Для правої частини рівності (3.64)

$$\begin{aligned} & M \left[\frac{1}{2} \int_0^T W(t) dt + \frac{1}{2\pi i} \int_0^T \int_{-\infty}^{\infty} e^{iu[W(t)-\beta]} W(t) \frac{du}{u} dt - \beta \cdot \bar{\tau}_{\beta} \cdot \bar{v}_{\beta} \cdot T \right] = \\ & = \frac{1}{2} \int_0^T \bar{w} dt + \frac{1}{2\pi i} \int_0^T \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i\beta u} M \left[e^{iuW(t)} W(t) \right] \frac{du}{u} dt - \beta \cdot \bar{\tau}_{\beta} \cdot \bar{v}_{\beta} \cdot T \end{aligned} \quad (3.65)$$

Математичне очікування, що стоїть у (3.65) під знаком інтеграла, може бути висловлене через характеристичну функцію $E(u)$ процесу $W(t)$, яка визначається так

$$E(u) = M[e^{iuW}] = \int_{-\infty}^{\infty} e^{i u w} f_w(w) dw, \quad (3.66)$$

де $f_w(w)$ – щільність ймовірності випадкової величини W .

Зручність застосування характеристичної функції (3.66) пов'язана з тим, що всі моменти випадкової функції можуть бути отримані з характеристичної функції (3.66) шляхом диференціювання. Ряд викладок простіше виконувати, користуючись не щільністю ймовірності, а характеристичними функціями, знаючи які завжди можна знайти щільності ймовірності випадкових величин, застосувавши зворотне перетворення Фур'є

$$f_w(w) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i u w} E(u) du. \quad (3.67)$$

Оскільки

$$\frac{1}{i} \frac{d}{du} E(u) = \frac{1}{i} \frac{d}{du} \int_{-\infty}^{\infty} e^{i u w} f_w(w) dw = \int_{-\infty}^{\infty} e^{i u w} w \cdot f_w(w) dw = M[e^{i u W(t)} W(t)]. \quad (3.68)$$

Підставляючи (3.68) в (3.65), виконуючи інтегрування по t , оскільки підінтегральні вирази не залежать від часу, і скорочуючи обидві частини рівності на час T , отримаємо

$$\bar{s} \cdot \bar{v}_\beta = \frac{1}{2} \bar{w} - \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i u \beta} \frac{dE(u)}{du} \frac{du}{u} - \beta \cdot \bar{\tau}_\beta \cdot \bar{v}_\beta. \quad (3.69)$$

Інтеграл

$$J = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i u \beta} \frac{dE(u)}{du} \frac{du}{u} \quad (3.70)$$

може бути виражений через щільність ймовірності $f_w(w)$. Дійсно, розглядаючи інтеграл (3.70) як функцію β та диференціюючи обидві частини рівності по β отримаємо

$$\frac{\partial J}{\partial \beta} = -\frac{i}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-iu\beta} \frac{dE(u)}{du} du = \frac{\beta}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-iu\beta} E(u) du = \beta \cdot f_w(\beta), \quad (3.71)$$

де $f_w(\beta)$ – щільність ймовірності випадкової величини $W(t)$, взята при аргументі β .

Інтегруючи (3.71) від $-\infty$ до поточного значення β , отримаємо

$$J(\beta) = \int_{-\infty}^{\beta} w f_w(w) dw + c. \quad (3.72)$$

Для визначення постійної інтегрування c підставимо (3.72) у (3.69) та покладемо $\beta = \infty$. Так як при цьому випадку

$$\bar{e} \cdot \bar{v}_\beta = 0$$

(імовірність викиду за дуже високий рівень прагне нуля), отримаємо

$$c = -\frac{1}{2} \bar{w}. \quad (3.73)$$

Таким чином,

$$\bar{e} \cdot \bar{v}_\beta = \bar{w} - \int_{-\infty}^{\beta} w f_w(w) dw - \beta \cdot \bar{\tau}_\beta \cdot \bar{v}_\beta,$$

тобто середня електроенергія $\bar{e}$, яка обмежена реалізацією випадковою функцією вище за заданий рівень β під час викиду, якщо вважати випадкову функцію $W(t)$ стаціонарною, дорівнює

$$\bar{e} = \frac{\bar{w}}{\bar{v}_\beta} - \frac{1}{\bar{v}_\beta} \int_{-\infty}^{\beta} w f_w(w) dw - \beta \cdot \bar{\tau}_\beta. \quad (3.74)$$

Для подальших обчислень необхідно задати вид закону розподілу ординат випадкової функції $W(t)$. Якщо процес нормальний, то

$$f_w(w) = \frac{1}{\sigma_w \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(w-\bar{w})^2}{2\sigma_w^2}} \quad (3.75)$$

і інтеграл в (3.74) може бути розрахований. Виконуючи обчислення, отримаємо з урахуванням (3.57) для середньої електроенергії викиду

$$\bar{e} = \frac{\sigma_w^2 \sqrt{2\pi}}{\sigma_v} + \frac{(\bar{w} - \beta) \sigma_w \pi}{\sigma_v} \left[1 - \Phi \left(\frac{\beta - \bar{w}}{\sigma_w} \right) \right] e^{\frac{(\beta - \bar{w})^2}{2\sigma_w^2}}. \quad (3.76)$$

де $\sigma_w^2 = K_w(0)$, $\sigma_v^2 = -\frac{d^2}{d\tau^2} K_w(\tau) \Big|_{\tau=0}$;

$K_w(\tau)$ – автоковаріаційна функція потужності $W(t)$.

Для знаходження статистичних характеристик реалізацій випадкових процесів природно скористатися розробленими в математичній статистиці принципами обробки дослідного матеріалу. Для цього необхідно перейти до послідовності реалізації випадкової величини, отриманої шляхом дискретизації випадкового процесу

$$w_1, w_2, \dots, w_i, \dots, w_n, \quad (3.77)$$

де $w_i = w(i \cdot \Delta)$, $i = 1, 2, \dots, n$, $n \cdot \Delta = T$.

Тоді оцінка математичного очікування, тобто середнє, знаходиться за формулою

$$\bar{w} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n w_i. \quad (3.78)$$

Вибіркова дисперсія визначається формулою

$$\sigma_w^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (w_i - \bar{w})^2, \quad (3.79)$$

В свою чергу, вибірка оцінка автокореляційної функції знаходиться по формулі

$$\hat{R}_w^o(k) = \frac{1}{\sigma_w^2(n-1)} \sum_{i=1}^{n-k} (w_i - \bar{w})(w_{i+k} - \bar{w}), \quad k = 0, 1, \dots, m. \quad (3.80)$$

Враховуючи особливості стаціонарного випадкового процесу потужності споживання електроенергії $W(t)$, структуру аналітичної формули автокореляційної функції доцільно вибрати у вигляді [83]

$$R_w(\gamma, \tau) = e^{-\gamma|\tau|} \cdot (1 + \gamma \cdot |\tau|), \quad (3.81)$$

де γ – параметр.

Для знаходження параметра γ аналітичної формули (3.81) необхідно провести апроксимацію формули (3.80) шляхом мінімізації функціонала

$$F(\gamma) = \sum_{k=1}^m \left(R_w(\gamma, k \cdot \Delta) - \hat{R}_w^0(k) \right)^2 \rightarrow \min_{\gamma} . \quad (3.82)$$

З урахуванням того, що

$$F(\gamma_0) = \min_{\gamma} \sum_{k=1}^m \left(R_w(\gamma, k \cdot \Delta) - \hat{R}_w^0(k) \right)^2 ,$$

аналітична формула автоковаріаційної функції запишеться у вигляді

$$K_w(\gamma_0, \tau) = \sigma_w^2 \cdot R_w(\gamma_0, \tau). \quad (3.83)$$

Тоді, згідно (3.83), маємо

$$K_w(\gamma_0, 0) = \sigma_w^2 \cdot R_w(\gamma_0, 0) = \sigma_w^2. \quad (3.84)$$

Далі, знаходимо дисперсію випадкової функції $V(t)$ шляхом обчислення похідної другого порядку від автоковаріаційної функції (3.83)

$$\sigma_v^2 = -\sigma_w^2 \cdot \left[-\gamma_0^2 e^{-\gamma_0 \tau} (1 - \gamma_0 \tau) \right] \Big|_{\tau=0} = \gamma_0^2 \cdot \sigma_w^2. \quad (3.85)$$

Враховуючи (3.85), формула (3.76) середньої електроенергії викиду при стаціонарній випадковій потужності електроенергії W вище заданого рівня β прийме вигляд

$$\bar{e} = \frac{\sigma_w \sqrt{2\pi}}{\gamma_0} - \frac{(\beta - \bar{w}) \cdot \pi}{\gamma_0} \left[1 - \Phi \left(\frac{\beta - \bar{w}}{\sigma_w} \right) \right] e^{\frac{1}{2} \left(\frac{\beta - \bar{w}}{\sigma_w} \right)^2}. \quad (3.86)$$

Аналіз формули (3.86) показує, що вона залежить від чотирьох незалежних аргументів $-\beta, \gamma_0, \bar{w}, \sigma_w$. Така кількість змінних викликає певні труднощі при дослідженні залежності формули (3.89) від цих розрізнених аргументів. Тому представляється доцільним об'єднати ці аргументи в групи у вигляді множників. Для цього виділені дві групи множників

$$\Lambda = \frac{\beta - \bar{w}}{\sigma_w}, \quad \lambda = \sqrt{2\pi} \frac{\sigma_w}{\gamma_0} \quad (3.87)$$

Перша група множників визначає відхилення заданого рівня ПЯЕ спожитої електроенергії β від середнього значення $\bar{w}$, яка обчислена в

одиницях середньо квадратичного відхилення потужності спожитої електроенергії σ_w . Друга група множників дорівнює величині спожитої електроенергії при нульовому відхиленні заданого рівня спожитої електроенергії β від середнього його значення $\bar{w}$ тобто, коли $\Delta = 0$.

В результаті застосування позначень (3.87) формула (3.86) прийме вигляд

$$\bar{e}(\Delta, \lambda) = \lambda \left\{ 1 - \Delta \cdot \sqrt{\frac{\pi}{2}} [1 - \Phi(\Delta)] e^{\frac{\Delta^2}{2}} \right\}. \quad (3.88)$$

Аналіз формули (3.88) показує, що вона залежить тільки від двох змінних, що значно спрощує її дослідження. Більш того, формулу (2.88) можна представити у безрозмірному вигляді

$$\hat{e}(\Delta) = 1 - \Delta \cdot \sqrt{\frac{\pi}{2}} [1 - \Phi(\Delta)] e^{\frac{\Delta^2}{2}}, \quad (3.89)$$

де $\hat{e}(\Delta) = \frac{\bar{e}(\Delta, \lambda)}{\lambda}$.

Треба підкреслити, що дослідження формул (3.88) або (3.89) за допомогою груп множників (3.87) дозволяє при одному значенні множника визначити нескінчену кількість значень співмножників, які утворюють цей множник. Зрозуміло, що це значно спрощує дослідження по заданим формулам.

На рис. 3.1 представлений графік функції (3.89).

Аналіз графіка, приведенного на рис. 3.1, показує, що має місце монотонне спадання середньої величини викиду рівнів електроенергії. Зрозуміло, що найбільша величина середнього викиду буде, коли $\Delta = 0$, тобто

$$\bar{e}(\Delta = 0, \lambda) = \lambda, \quad (3.90)$$

Графік функції (3.89) показує, що при зростанні відхилення від середньої величини рівня спожитої електроенергії ПЯЕ монотонно зменшується.

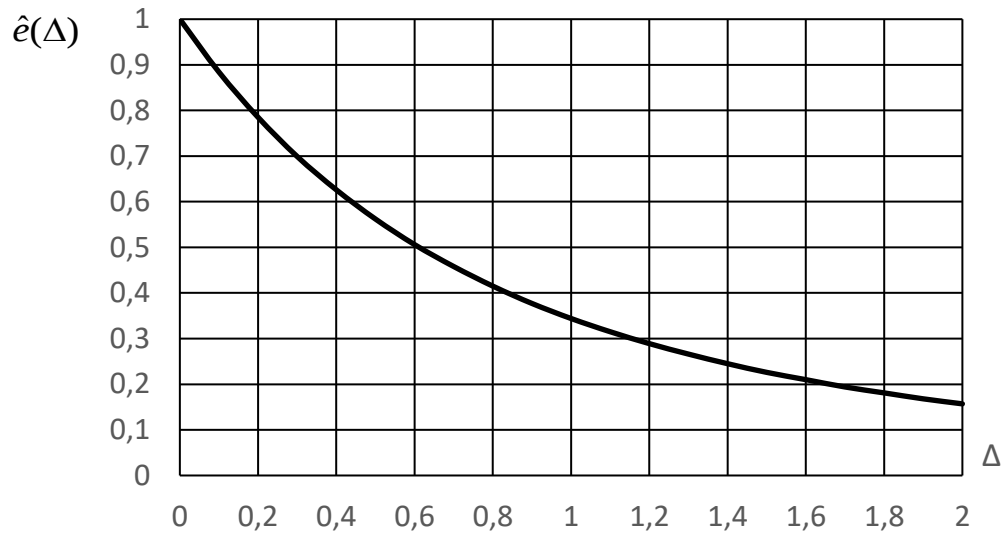


Рисунок 3.1 – Графічне відображення функції (2.89)

Видається доцільним апроксимувати отриману формулу (3.89) для зручності застосування більш простим аналітичним виразом. Аналіз графіка функції (3.89) вказує на зручність вибору структури формули у вигляді експоненційної залежності, тобто

$$\hat{e}(\Delta) = e^{-k \cdot \Delta}, \quad (3.91)$$

де k – параметр.

Для знаходження параметра був застосований функціонал

$$S(k) = \sum_{i=1}^n \left(1 - \Delta_i \cdot \sqrt{\frac{\pi}{2}} [1 - \Phi(\Delta_i)] e^{\frac{\Delta_i^2}{2}} - e^{-k \cdot \Delta_i} \right)^2 \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad n = 20 \quad (3.92)$$

Мінімізація функціонала (3.92) по параметру k дало оптимальну величину параметра

$$k_0 = -1,115. \quad (3.93)$$

При цьому коефіцієнт кореляції склав величину

$$r = 0,999. \quad (3.94)$$

Згідно шкалі Чеддока [70] така величина коефіцієнта кореляції вказує на вельми високий зв'язок між досліджуємих функціями.

Враховуючи (3.93) наближення моделі (3.91) прийме вигляд

$$\hat{e}(\Delta) = e^{-1,115 \cdot \Delta}. \quad (3.95)$$

На рис. 3.2 представлені графіки функцій (3.89) і (3.95). Аналіз графіків, приведених на рис. 3.2, вказує на досить добре наближення моделі, яка представлена функцією (3.89), формулою (3.95). Таким чином, в подальшому доцільно користуватися формулою (3.95) замість формули (3.89). Тоді формула (3.88) прийме вигляд

$$\bar{e}(\Delta, \lambda) = \lambda \cdot e^{-1,115 \cdot \Delta}. \quad (3.96)$$

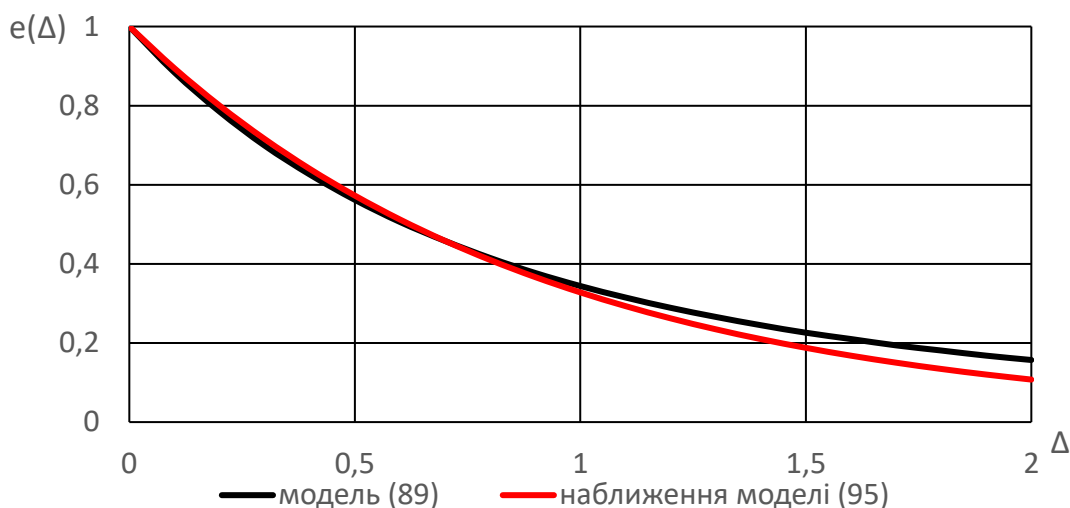


Рисунок 3.2 – Графіки функцій (3.89) та (3.95)

Усі подальші розрахунки і побудова таблиць і графіків проводились за допомогою електронних таблиць Excel і математичного пакету Mathcad.

В якості прикладу для більшої наочності розглянемо споживання електроенергії на діючому підземному руднику на правах шахти № 9 ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг», як достатньо типової в своїй галузі (див. табл. 3.1).

Таблиця 3.1 – Рівні річного споживання електроенергії підземного рудника на правах шахти № 9 ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг»

№	Рік	Рівні споживання електроенергії, кВт
0	2001	10200
1	2002	10250
2	2003	10000
3	2004	10200
4	2005	10300
5	2006	10250
6	2007	10110
7	2008	10250
8	2009	10300
9	2010	10200
10	2011	10250
11	2012	10245
12	2013	10242
13	2014	10445
14	2015	10500
15	2016	10250
16	2017	10300
17	2018	10400
18	2019	10100
19	2020	10500

На рис. 3.3 представлений графік споживання електроенергії згідно даних табл. 3.1.

Аналіз графіка, приведеного на рис. 3.2, показує і підтверджує, що відхилення рівнів споживання електроенергії носить стохастичний характер відносно середньої величини, графік якої позначений червоним кольором.

Середня величина спожитої електроенергії дорівнює

$$\bar{w} = \frac{1}{20} \sum_{i=0}^{19} w_i = 10264,6. \quad (3.96)$$

Середнє квадратичне відхилення спожитої електроенергії дорівнює

$$\sigma_w = \sqrt{\frac{1}{19} \sum_{i=0}^{19} (w_i - 10264,6)^2} = 125,86. \quad (3.97)$$

Вибіркова оцінка автокореляційної функції знаходиться, згідно (3.14), по формулі

$$\hat{R}_w^0(k) = \frac{1}{300950,8} \sum_{i=1}^{n-k} (w_i - 10264,6)(w_{i+k} - 10264,6), \quad k = 0, 1, \dots, 5. \quad (3.98)$$

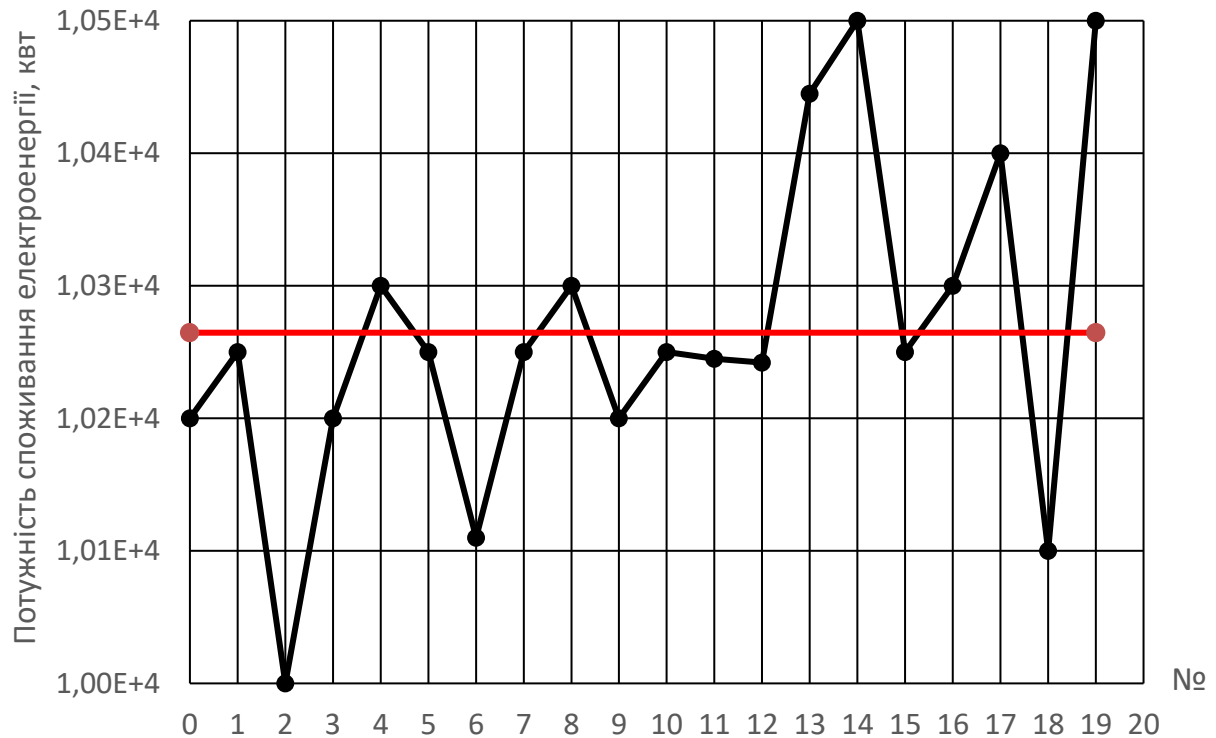


Рисунок 3.3 – Варіант аналізованої динаміки споживання електроенергії споживачами підземного рудника з видобутку залізної руди

В якості структури аналітичної формули автокореляційної функції потужності $W(t)$ була вибрана формула (3.81).

Для наближення функцій (3.81) і (3.98) за допомогою параметра γ була застосована мінімізація функціоналу (3.82). В результаті отримуємо, що $\gamma_0 = 3,646$, і формула (3.81) приймає вигляд

$$R_w(\tau) = e^{-3,646|\tau|} (1 + 3,646 \cdot |\tau|). \quad (3.99)$$

На рис. 3.4 представлені графіки вибіркової оцінки автокореляційної функції (3.98) і її наближення (3.99).

Аналіз графіків, приведених на рис. 3.3, показує задовільне наближення вибіркової оцінки кореляційної функції (3.98) її апроксимацією (3.99) в заданих межах зміщення часу.

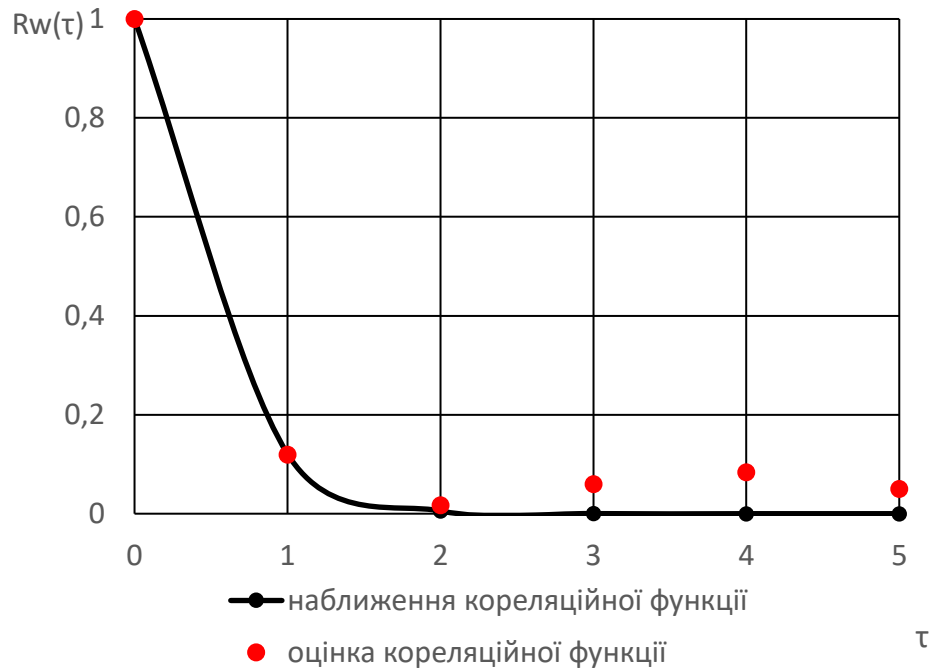


Рисунок 3.4 – Графіки вибіркової оцінки кореляційної функції (3.28) і її наближення (3.99)

Далі обчислимо коефіцієнт кореляції для визначення достовірності формули (3.99). Обчислення коефіцієнта детермінації проводилось по формулі

$$r = \sqrt{1 - \frac{ESS}{TSS}}, \quad (3.100)$$

$$\text{де } ESS = \sum_{k=0}^5 [\hat{R}_w^o(k) - R_w(k)]^2;$$

$$TSS = \sum_{k=0}^5 \left[\hat{R}_w^o(k) - \frac{1}{6} \sum_{k=0}^5 \hat{R}_w^o(k) \right]^2.$$

Обчислюючи необхідні суми і підставляючи їх в формулу (3.100), знаходимо

$$r = \sqrt{1 - \frac{0,013273}{0,732584}} = 0,991 \quad (3.101)$$

Згідно шкалі Чеддока величина коефіцієнта детермінації (3.101) вище 0,9, тобто

$$r = 0,991 > 0,9 ,$$

що вказує на « вельми високу» тісноту зв'язку за абсолютною величиною.

Згідно формул (3.83) і (3.99) аналітична формула автоковаріаційної функції приймає вигляд

$$K_w(\tau) = 15839,5 \cdot e^{-3,648|\tau|} (1 + 3,646 \cdot |\tau|). \quad (3.102)$$

Користуючись формулою (3.19), маємо

$$\sigma_v = 3,646 \cdot 125,86 = 458,87. \quad (3.103)$$

Користуючись отриманими вище формулами, знаходимо якісні характеристики використання електроенергії на досліджуваній шахті.

Згідно формули (3.57) з урахуванням (3.96), (3.97), (3.103) була здобута формула, яка визначає середню кількість викидів в одиницю часу (в нашому випадку за рік) відносно середньої величини спожитої електроенергії (3.96)

$$\bar{v}_\beta = \frac{\gamma_0}{2\pi} e^{-\frac{(\beta - \bar{w})^2}{2\sigma_w^2}},$$

або , з урахуванням чисельних значень величин

$$\bar{v}_\beta = 0,58 \cdot e^{-\frac{(\beta - 10264,6)^2}{31679,03}}. \quad (3.104)$$

На рис. 3.5 представлений графік залежності середньої кількості викидів за рік в залежності від величини межі викиду. Аналіз приведенного графіка показує, що з ростом величини викиду середня кількість викидів за рік досить швидко зменшується.

Згідно формули (3.58) з урахуванням (3.96), (3.97), (3.103) була здобута формула, яка визначає середню тривалість викидів в одиницю часу (в нашому випадку за рік) відносно межі викидів (3.96)

$$\bar{\tau}_\beta = \frac{\pi}{\gamma_0} e^{-\frac{(\beta - \bar{w})^2}{2\sigma_w^2}} \left[1 - \Phi \left(\frac{\beta - \bar{w}}{\sigma_w} \right) \right],$$

або з урахуванням чисельних значень величин

$$\bar{\tau}_{\beta} = 0,8617e^{-\frac{(\beta-10264,6)^2}{31679,08}} \left[1 - \Phi \left(\frac{\beta - 10264,6}{125,86} \right) \right]. \quad (3.105)$$

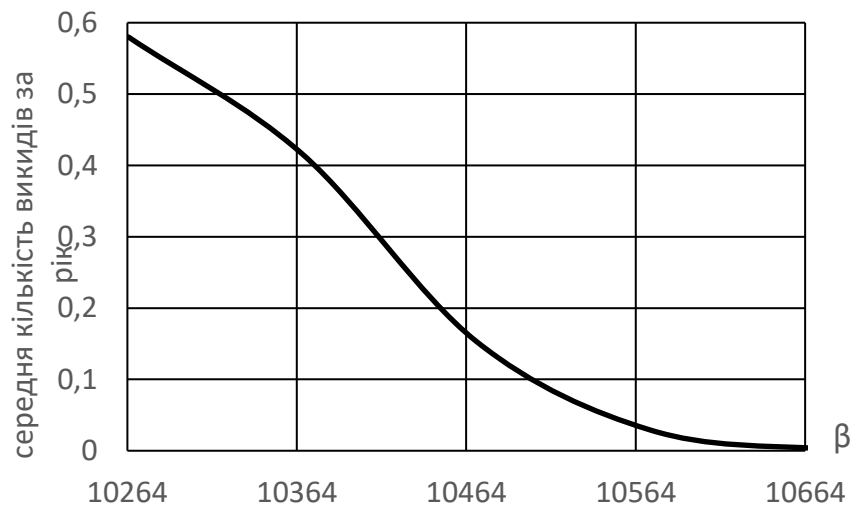


Рисунок 3.5 – Залежність середньої кількості викидів відхилення рівнів споживання електроенергії за рік від межі величини викиду відносно середньої величини спожитої електроенергії

На рис. 3.6 представлений графік залежності середньої тривалості викидів за рік в залежності від величини межі викиду. Аналіз приведенного графіка показує, що з ростом величини межі викиду середня їх тривалість за рік досить швидко зменшується.

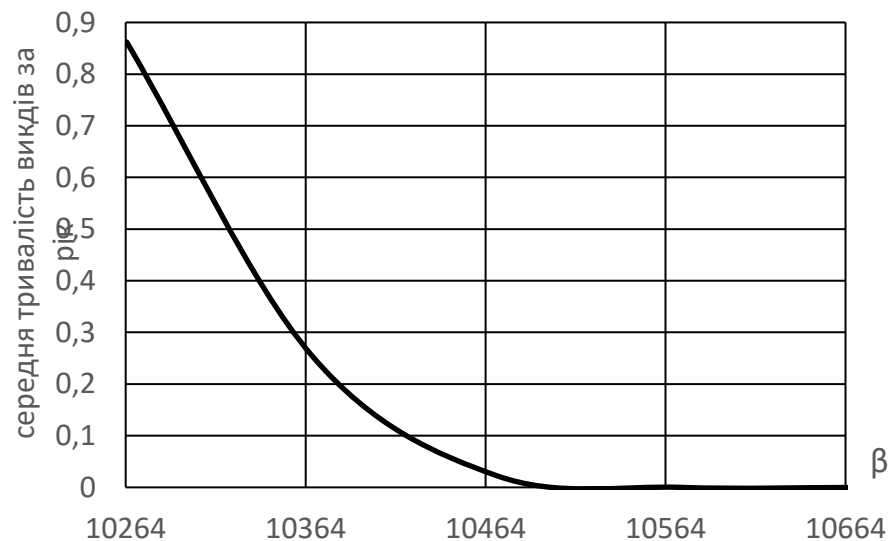


Рисунок 3.6 – Залежності середньої тривалості викидів рівнів споживання електроенергії за рік від межі величини викиду відносно середньої величини спожитої електроенергії

Важливою оцінкою якості споживання електроенергії є середня величина викиду при стаціонарній випадковій потужності електроенергії W вище заданого рівня β , яка визначається формулою (3.86)

$$\bar{e}_{\beta} = \frac{\sigma_w \sqrt{2\pi}}{\gamma_0} - \frac{(\beta - \bar{w}) \cdot \pi}{\gamma_0} \left[1 - \Phi \left(\frac{\beta - \bar{w}}{\sigma_w} \right) \right] \cdot e^{\frac{(\beta - \bar{w})^2}{2\sigma_w^2}},$$

або з урахуванням чисельних значень величин

$$\bar{e}_{\beta} = 86,529 - 0,862 \cdot (\beta - 10264,6) \cdot \left[1 - \Phi \left(\frac{\beta - 10264,6}{125,86} \right) \right] \cdot e^{\frac{(\beta - 10264,6)^2}{31679,08}}. \quad (3.106)$$

На рис. 3.7 наведено графік залежності середньої величини викиду рівнів електроенергії за рік в залежності від величини межі викиду. Аналіз приведенного графіка показує, що з ростом величини межі викиду середня величина викиду електроенергії за рік досить швидко зменшується.

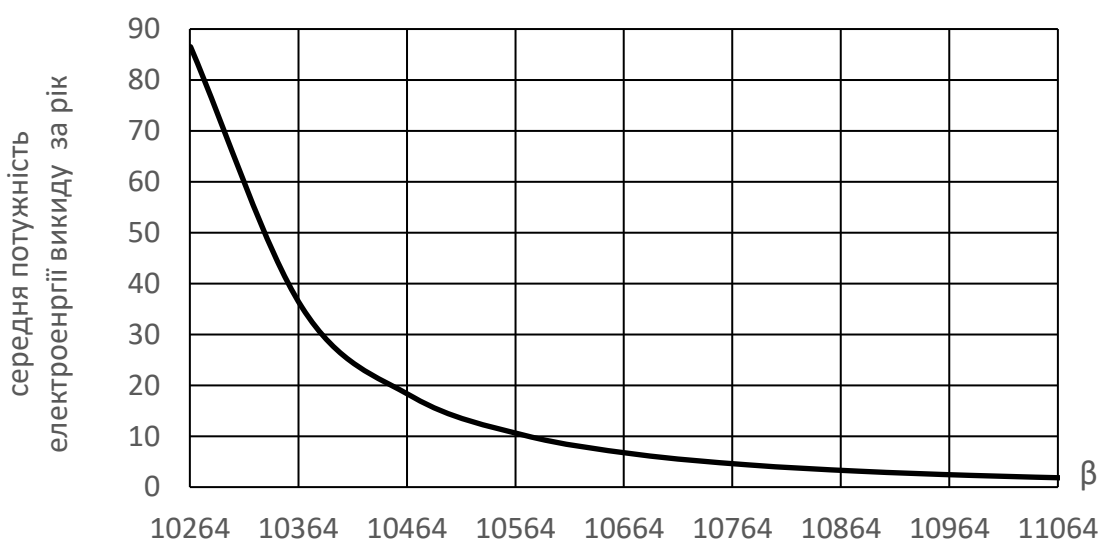


Рисунок 3.7 – Залежності середньої величини викиду рівнів споживання електроенергії за рік від межі величини викиду відносно середньої величини спожитої електроенергії

Таким чином, розрахунки показують, що на виділеному проміжку часу електроспоживання на конкретному прикладі діючої шахти відбувалися випадкові викиди по споживанню електроенергії внаслідок статистичних особливостей споживання ЕЕ.

Приклад застосування розрахунку електропостачання на аналізованому гірничорудному підприємстві підтвердив можливість використання розробленої методики.

Напрями подальшого пошуку доцільно спрямувати на дослідження факторів впливу на ПЯЕ на даних видах залізрудних підприємств.

3.2 Синтез факторного впливу на якість електроенергії

Як зазначалось в Розділі 1 на ПЯЕ, а точніше на їх рівень, впливає ряд як природних, так і штучних факторів [27-31]. Причому вплив цих факторів на якість електроенергії різний за рівнем своєї дії. Таким чином, для побудови математичної багатофакторної моделі за якістю електроенергії треба враховувати не тільки самі фактори, але й ступінь впливу кожного фактору на загальну якість електроенергії. Формування багатофакторної моделі найкращим чином віддзеркалює й інтегрує вплив факторів на ПЯЕ.

Під багатофакторною моделлю якості електроенергії розуміється залежність F , яка пов'язує узагальнену якість електроенергії Q з його входом $\vec{q} = (q_1, q_2, \dots, q_n)$ – вектором якостей електроенергії окремих компонентів

$$Q = F(\vec{q}). \quad (3.107)$$

Відповідно до загального підходу до побудови математичної моделі об'єкта, що розглядається, на першому кроці, необхідно провести структурний синтез моделі. На цьому етапі визначається вид залежності F без урахування значень її параметрів. Зробимо умовно наступну операцію: «розщепимо» модель F на її структуру St та параметри $c_1, c_2, \dots, c_n$, тобто представимо модель у вигляді пари

$$F = \langle St, \vec{C} \rangle, \quad (3.108)$$

де $\vec{C} = (c_1, c_2, \dots, c_n)$ – вектор параметрів моделі.

На етапі структурного синтезу визначається лише структура St моделі, а конкретними значеннями параметрів вектору $\vec{C}$ не цікавляться. Під структурою у загальному випадку прийнято розуміти вид елементів, з яких

складається об'єкт, і відносин між елементами. Існує багато різноманітних структур математичних моделей. Лінійність, статичність, детермінованість, дискретність, мультиплікативність тощо є структурними категоріями [70].

Аналіз якості електроенергії Q як багатофакторної моделі залежно від рівнів складових ПЯЕ її компонент q_i , $(i=1,2,...,n)$ показує, що структура цієї моделі може бути представлена як статична і мультиплікативна.

В цьому випадку модель записується у вигляді

$$Q = k \cdot q_1^{c_1} \cdot q_2^{c_2} \cdot \dots \cdot q_n^{c_n}, \quad (3.109)$$

або в згорнутому вигляді

$$Q = k \cdot \prod_{i=1}^n q_i^{c_i}. \quad (3.110)$$

Конкретні значення параметрів $c_1, c_2, \dots, c_n$ поки не важливі, важливий лише вид залежності, тобто мультиплікативність структури St .

Таким чином, на етапі структурного синтезу визначається лише вид та характер моделі, а її параметри визначаються на етапі ідентифікації параметрів моделі. Разом з тим, є сенс провести аналіз властивостей обраної структури багатофакторної моделі. Згідно з визначенням якості електроенергії мають місце обмеження

$$0 \leq Q \leq 1, \quad 0 \leq q_i \leq 1, \quad (i=1,2,...,n). \quad (3.111)$$

Більше того, нехай

$$\hat{q}_i = 1, \quad (i=1,2,...,n), \quad (3.112)$$

тоді

$$Q = \lim_{n \rightarrow \infty} k \cdot \prod_{i=1}^n \hat{q}_i^{c_i} = k \cdot \lim_{n \rightarrow \infty} \prod_{i=1}^n \hat{q}_i^{c_i} = k \cdot 1 = k. \quad (3.113)$$

Але при умові (3.112) згідно (3.113) має місце

$$Q = 1. \quad (3.114)$$

Враховуючи (3.112) і (3.113), має місце

$$k = 1. \quad (3.115)$$

Згідно (3.115) математична модель (3.110) прийме вигляд

$$Q = \prod_{i=1}^n q_i^{c_i}. \quad (3.116)$$

Здобута структура моделі (3.116) відповідає усім вимогам (3.111).

Визначимо зміст параметрів $c_1, c_2, \dots, c_n$ в моделі (3.116). Якщо параметр $c_i = 0$, то компонента q_i , яка визначає локальну якість електроенергії, не враховується.

Для з'ясування змісту параметрів c_i прологарифмуємо формулу (3.116)

$$\ln Q = \ln \left(\prod_{i=1}^n q_i^{c_i} \right), \quad \ln Q = \sum_{i=1}^n c_i \cdot \ln q_i. \quad (3.117)$$

У формулі (3.117) обчислимо частинну похідну за змінною q_i

$$\frac{\partial \ln Q}{\partial q_i} = \frac{\partial}{\partial q_i} \left(\sum_{i=1}^n c_i \cdot \ln q_i \right) = \frac{c_i}{q_i}, \quad \frac{1}{Q} \cdot \frac{\partial Q}{\partial q_i} = \frac{c_i}{q_i}. \quad (3.118)$$

Таким чином, згідно (3.118) величина параметра c_i визначає чутливість загальної якості Q відносно компоненти якості q_i , тобто наскільки сильно впливає величина компоненти якості q_i на величину загальної якості Q . Зрозуміло, що також повинно виконуватися обмеження

$$c_i \geq 0, \quad (i = 1, 2, \dots, n). \quad (3.119)$$

Наступний етап синтезу моделі полягає у проведенні ідентифікації параметрів моделі c_i , яка пов'язана з визначенням чисельних значень параметрів $\hat{C} = (c_1, c_2, \dots, c_n)$. Вихідною інформацією для ідентифікації є структура St та спостереження за поведінкою входу $\hat{q}(t)$ та виходу $Q(t)$ об'єкта в реальних умовах. Таким чином, пара

$$I(t) = \langle \hat{q}(t); Q(t) \rangle \quad (3.120)$$

у загальному випадку є основним джерелом інформації при ідентифікації.

Враховуючи, що спостереження станів входу $\hat{q}(t)$ та виходу $Q(t)$ в процесі експлуатації проводяться в дискретні моменти часу, то формула (3.120) набуває вигляду

$$I = \langle \hat{q}_k; Q_k \rangle, \quad k = 1, 2, \dots, N, \quad (3.121)$$

яку зручно записати у вигляді

$$\prod_{i=1}^n q_{i,k}^{c_i} = Q_k, \quad (k=1,2,\dots,N). \quad (3.124)$$

Зрозуміло, що при цьому необхідно виконання умови $N \geq n$. В іншому випадку кількість невідомих виявиться меншою за кількість рівнянь і система (3.124) не матиме однозначного рішення.

Таким чином, задача неадаптивної ідентифікації статичної моделі (3.116) зводиться до розв'язання системи рівнянь (3.124). Ця система має дві істотні властивості, які визначають труднощі, що виникають при її вирішенні: несумісність і трансцендентність. Її несумісність пов'язані з випадком $N > n$ (число рівнянь більше, ніж невідомих), а трансцендентність - з довільним вибором структури моделі. Вочевидь, що проблеми неадаптивного методу вирішення завдання ідентифікації пов'язані з розв'язанням несумісної трансцендентної системою рівнянь. Почнемо з несумісності, тобто коли $N > n$

Несумісну систему рівнянь (3.124) вирішимо методом найменших квадратів, тобто мінімізуючи сумарну нев'язку правих і лівих частин рівнянь цієї системи. Для цього утворюємо функцію сумарної нев'язки у вигляді суми квадратів нев'язок кожного з рівнянь

$$F(c_1, c_2, \dots, c_n) = \sum_{k=1}^N \left[\prod_{i=1}^n q_{i,k}^{c_i} - Q_k \right]^2. \quad (3.125)$$

Функція (3.125) невід'ємна і дорівнює нулю при збігу правих та лівих частин рівнянь системи (3.124). При цьому чим ближче праві частини рівняння системи (3.124) близькі до лівих частин, тим менше величина функції нев'язки (3.125). Це дає підставу вважати рішенням системи (3.124) такі значення параметрів

$$\vec{C}^* = (c_1^*, c_2^*, \dots, c_n^*), \quad (3.126)$$

при яких функція нев'язки мінімальна, тобто

$$F(c_1^*, c_2^*, \dots, c_n^*) = \min_{c_1, c_2, \dots, c_n} F(c_1, c_2, \dots, c_n).$$

Отже, на вирішення несумісної системи рівнянь (3.124) досить мінімізувати функцію сумарної нев'язки (3.125).

Для ідентифікації функції (3.124) функція сумарної нев'язки (3.125) досить складна, оскільки включає показові функції. Тому пропонується застосувати таке перетворення, яке перевело б операцію множення в операцію складання, не змінюючи результат мінімізації функції (3.124). Для цього можна застосувати дію логарифмування, яке переводить множення в додавання. В результаті формула (3.116) прийме вигляд (3.110)

$$\ln Q = \sum_{i=1}^n c_i \cdot \ln q_i.$$

Для зручності подальших розрахунків доцільно ввести позначення

$$\ln Q = y, \quad \ln q_i = x_i. \quad (3.127)$$

Тоді формула (3.111) з урахуванням (3.21) прийме вигляд

$$y = \sum_{i=1}^n c_i \cdot x_i. \quad (3.128)$$

Специфіка такої структури полягає в лінійності функції щодо параметрів, що визначається, $c_1, c_2, \dots, c_n$.

В свою чергу, функція сумарної нев'язки запишеться у вигляді

$$S(c_1, c_2, \dots, c_n) = \sum_{k=1}^N \left(\sum_{i=1}^n c_i \cdot x_{i,k} - y_k \right)^2. \quad (3.129)$$

Ця лінійність дозволяє звести завдання мінімізації функції нев'язки (3.129) до розв'язання системи лінійних рівнянь алгебри.

Простий вид функції (3.128) дозволяє вирішити задачу мінімізації (3.129), прирівнявши нулю частинні похідні функції (3.129), відповідно до необхідної умови існування екстремуму, тобто

$$\frac{\partial}{\partial c_j} S(c_1, c_2, \dots, c_n) = \frac{\partial}{\partial c_j} \left[\sum_{k=1}^N \left(\sum_{i=1}^n c_i \cdot x_{i,k} - y_k \right)^2 \right] = 0, \quad (j=1, 2, \dots, n) \quad (3.130)$$

Так як функція (3.128) є лінійною функцією щодо параметрів $c_1, c_2, \dots, c_n$, то $S(c_1, c_2, \dots, c_n)$ в (3.129) – квадратична функція, чим і зумовлюється

Цей визначник дорівнює нулю у двох випадках: при $n > N$, тобто коли недостатньо вимірювань, і при недостатній варіабельності $x_1, x_2, \dots, x_n$, тобто коли більш, ніж $N - n$ станів лінійно залежні. Реагувати на цю ситуацію можна подвійно: або збільшувати кількість спостережень N , або зменшити число n .

Розглянемо метод Крамера розв'язання системи алгебраїчних рівнянь (3.132) [80].

Для цього використовуються формули Крамера. Спочатку складається визначник згідно системи рівнянь (3.132) із коефіцієнтів при невідомих параметрах $c_1, c_2, \dots, c_n$

$$\Delta = \begin{vmatrix} \varphi_{1,1} & \varphi_{2,1} & \dots & \varphi_{n,1} \\ \varphi_{1,2} & \varphi_{2,2} & \dots & \varphi_{n,2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \varphi_{1,n} & \varphi_{2,n} & \dots & \varphi_{n,n} \end{vmatrix} \quad (3.135)$$

Якщо $\Delta \neq 0$, то складаємо визначники, послідовно замінюючи стовбці в (3.135) стовбцями вільних членів системи (3.135)

$$\Delta_1 = \begin{vmatrix} \eta_1 & \varphi_{2,1} & \dots & \varphi_{n,1} \\ \eta_2 & \varphi_{2,2} & \dots & \varphi_{n,2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \eta_n & \varphi_{2,n} & \dots & \varphi_{n,n} \end{vmatrix}, \quad \Delta_2 = \begin{vmatrix} \varphi_{1,1} & \eta_1 & \dots & \varphi_{n,1} \\ \varphi_{1,2} & \eta_2 & \dots & \varphi_{n,2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \varphi_{1,n} & \eta_n & \dots & \varphi_{n,n} \end{vmatrix}, \dots, \quad \Delta_n = \begin{vmatrix} \varphi_{1,1} & \varphi_{2,1} & \dots & \eta_1 \\ \varphi_{1,2} & \varphi_{2,2} & \dots & \eta_2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \varphi_{1,n} & \varphi_{2,n} & \dots & \eta_n \end{vmatrix}. \quad (3.136)$$

Розв'язок системи (3.132) знаходиться по формулам Крамера шляхом послідовного поділу (3.134) на (3.133)

$$c_1^\times = \frac{\Delta_1}{\Delta}, \quad c_2^\times = \frac{\Delta_2}{\Delta}, \quad \dots, \quad c_n^\times = \frac{\Delta_n}{\Delta}. \quad (3.137)$$

Таким чином, значення параметрів (3.137) мінімізують функцію нев'язки (3.129), тобто

$$S(c_1^\times, c_2^\times, \dots, c_n^\times) = \min_{c_1, c_2, \dots, c_n} S(c_1, c_2, \dots, c_n).$$

Більш того, ці значення параметрів (3.136) співпадають з параметрами (3.126), – мінімізують і функцію (3.125), тобто виконується

$$F(c_1^{\times}, c_2^{\times}, \dots, c_n^{\times}) = \min_{c_1, c_2, \dots, c_n} F(c_1, c_2, \dots, c_n).$$

Багатофакторна математична модель за якістю електроенергії згідно (3.116) і (3.135) прийме вигляд

$$Q_m = \prod_{i=1}^n q_i^{c_i^{\times}}. \quad (3.138)$$

Модель (3.138) дозволяє оцінити відносну помилку визначення якості електрики за відомими помилками якостей складових її компонентів. Дійсно, прологарифмуємо (3.138) і обчислимо диференціал

$$\begin{aligned} \ln Q_m &= \sum_{i=1}^n c_i^{\times} \cdot \ln q_i, \\ d(\ln Q_m) &= d\left(\sum_{i=1}^n c_i^{\times} \cdot \ln q_i\right), \\ \frac{dQ_m}{Q_m} &= \sum_{i=1}^n c_i^{\times} \cdot \frac{dq_i}{q_i}. \end{aligned} \quad (3.139)$$

Приймаючи, що

$$dQ_m \approx \Delta Q_m, \quad dq_i \approx \Delta q_i, \quad (i = 1, 2, \dots, n), \quad (3.140)$$

отримуємо шукану формулу

$$\delta Q_m = \sum_{i=1}^n c_i^{\times} \cdot \delta q_i, \quad (3.141)$$

де $\delta Q_m = \frac{\Delta Q_m}{Q_m}$, $\delta q_i = \frac{\Delta q_i}{q_i}$, $(i = 1, 2, \dots, n)$ – відносні похибки якостей електроенергії.

Розглянемо побудову багатофакторної моделі за якістю електроенергії на деякому прикладі.

Нехай виділено три параметри якості електроенергії: напруга U , частота ω , гармонічний склад кривої електричного струму χ . Відомо, що якість напруги U визначається як q_1 , якість частоти ω – q_2 і якість гармонічного

складу кривої електричного струму $\chi - q_3$. Тоді багатofакторна модель за якістю електроенергії запишеться у вигляді

$$Q = q_1^{c_1} \cdot q_2^{c_2} \cdot q_3^{c_3}. \quad (3.142)$$

Для ідентифікації моделі (3.142), тобто знаходження невідомих параметрів c_1, c_2, c_3 , необхідно мати статистичний матеріал відносно тих ПЯЕ, які входять в модель (3.142). Відповідний статистичний матеріал представлений в табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Інформація про ідентифікацію трифакторної моделі за якістю електроенергії

№	Q	q_1	q_2	q_3	$y = \ln Q$	$x_1 = \ln q_1$	$x_2 = \ln q_2$	$x_3 = \ln q_3$
1	0.9	0.95	0.96	0.97	-0.105	-0.051	-0.041	-0.030
2	0.89	0.92	0.93	0.95	-0.117	-0.083	-0.073	-0.051
3	0.85	0.91	0.93	0.9	-0.163	-0.094	-0.073	-0.105
4	0.88	0.93	0.94	0.89	-0.128	-0.073	-0.062	-0.117
5	0.84	0.91	0.89	0.9	-0.174	-0.094	-0.117	-0.105
6	0.85	0.92	0.9	0.88	-0.163	-0.083	-0.105	-0.128
7	0.83	0.9	0.89	0.87	-0.186	-0.105	-0.117	-0.139
8	0.87	0.89	0.89	0.91	-0.139	-0.117	-0.117	-0.094
9	0.91	0.96	0.92	0.95	-0.094	-0.041	-0.083	-0.051
10	0.93	0.98	0.95	0.97	-0.073	-0.020	-0.051	-0.030

Згідно даних табл. 3.2 об'єм статистики склав 10 даних. В перших чотирьох стовпцях знаходиться вихідна інформація щодо загальної якості електроенергії та якостей електроенергії трьох параметрів: напруги, частоти і гармонічного складу кривої електричного струму. У наступних чотирьох стовпцях наведено результати логарифмічних перетворень вихідних даних. В результаті логарифмічних перетворень вихідних даних математична модель набула вигляду

$$y = c_1 \cdot x_1 + c_2 \cdot x_2 + c_3 \cdot x_3. \quad (3.143)$$

При цьому функція сумарної нев'язки запишеться у вигляді

$$S(c_1, c_2, c_3) = \sum_{k=1}^{10} (c_1 \cdot x_1 + c_2 \cdot x_2 + c_3 \cdot x_3 - y_k)^2. \quad (3.144)$$

Згідно необхідної умові мінімізації (3.38) прирівнюємо нулю частинну похідну за невідомим параметром c_i

$$\frac{\partial}{\partial c_i} S(c_1, c_2, c_3) = 2 \sum_{k=1}^{10} (c_1 \cdot x_{1,k} + c_2 \cdot x_{2,k} + c_3 \cdot x_{3,k} - y_k) \cdot x_{i,k} = 0, \quad (i=1, 2, 3) \quad (2.145)$$

Розкриваючи умову (3.144), здобуваємо систему трьох лінійних алгебраїчних рівнянь з трьома невідомими c_1, c_2, c_3

$$\begin{cases} c_1 \cdot \sum_{k=1}^{10} x_{1,k}^2 + c_2 \cdot \sum_{k=1}^{10} x_{1,k} x_{2,k} + c_3 \cdot \sum_{k=1}^{10} x_{1,k} x_{3,k} = \sum_{k=1}^{10} x_{1,k} y_k \\ c_1 \cdot \sum_{k=1}^{10} x_{2,k} x_{1,k} + c_2 \cdot \sum_{k=1}^{10} x_{2,k}^2 + c_3 \cdot \sum_{k=1}^{10} x_{2,k} x_{3,k} = \sum_{k=1}^{10} x_{2,k} y_k \\ c_1 \cdot \sum_{k=1}^{10} x_{3,k} x_{1,k} + c_2 \cdot \sum_{k=1}^{10} x_{3,k} x_{2,k} + c_3 \cdot \sum_{k=1}^{10} x_{3,k}^2 = \sum_{k=1}^{10} x_{3,k} y_k \end{cases} \quad (3.146)$$

Результати обчислення сум, які присутні в системі рівнянь (3.146), представлені в табл. 3.3.

Таблиця 3.3 – Результати обчислень коефіцієнтів системи рівнянь (3.146)

№	x_1^2	$x_1 x_2$	$x_1 x_3$	x_2^2	$x_2 x_3$	x_3^2	$x_1 y$	$x_2 y$	$x_3 y$
1	0.002631	0.002094	0.001562	0.001666	0.001243	0.000928	0.005404	0.004301	0.003209
2	0.006952	0.006051	0.004277	0.005267	0.003722	0.002631	0.009717	0.008457	0.005977
3	0.008895	0.006844	0.009937	0.005267	0.007646	0.011101	0.015327	0.011794	0.017123
4	0.005267	0.00449	0.008457	0.003829	0.007211	0.01358	0.009277	0.00791	0.014897
5	0.008895	0.01099	0.009937	0.01358	0.012278	0.011101	0.016443	0.020318	0.01837
6	0.006952	0.008785	0.010659	0.011101	0.013469	0.016341	0.013551	0.017123	0.020775
7	0.011101	0.012278	0.014673	0.01358	0.016229	0.019394	0.019632	0.021714	0.025949
8	0.01358	0.01358	0.01099	0.01358	0.01099	0.008895	0.016229	0.016229	0.013134
9	0.001666	0.003404	0.002094	0.006952	0.004277	0.002631	0.00385	0.007864	0.004838
10	0.000408	0.001036	0.000615	0.002631	0.001562	0.000928	0.001466	0.003722	0.00221
Сума	0.066347	0.069553	0.073201	0.077453	0.078628	0.087529	0.110896	0.119432	0.126482

Згідно даних табл. 3.2 система рівнянь (3.146) приймає вигляд

$$\begin{cases} 0,066347 \cdot c_1 + 0,069553 \cdot c_2 + 0,073201 \cdot c_3 = 0,110896 \\ 0,069553 \cdot c_1 + 0,077453 \cdot c_2 + 0,078628 \cdot c_3 = 0,119432 \\ 0,073201 \cdot c_1 + 0,078628 \cdot c_2 + 0,087529 \cdot c_3 = 0,126482 \end{cases} \quad (3.147)$$

Матриця Фішера системи (3.147) має вигляд

$$\Phi = \begin{vmatrix} 0,066347 & 0,069553 & 0,073201 \\ 0,069553 & 0,077453 & 0,078628 \\ 0,073201 & 0,078628 & 0,087529 \end{vmatrix}. \quad (3.148)$$

Оскільки визначник матриці Фішера (3.148) не дорівнює нулю

$$|\Phi| = 1,8 \cdot 10^{-6} \neq 0,$$

то система рівнянь має однозначний розв'язок. Знайдемо цей розв'язок по формулам Крамера. Знаходимо визначники

$$\Delta = \begin{vmatrix} 0,066347 & 0,069553 & 0,073201 \\ 0,069553 & 0,077453 & 0,078628 \\ 0,073201 & 0,078628 & 0,087529 \end{vmatrix} = 1,80065 \cdot 10^{-6},$$

$$\Delta_1 = \begin{vmatrix} 0,110896 & 0,069553 & 0,073201 \\ 0,119432 & 0,077453 & 0,078628 \\ 0,126482 & 0,078628 & 0,087529 \end{vmatrix} = 1,12476 \cdot 10^{-6}$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} 0,066347 & 0,110896 & 0,073201 \\ 0,069553 & 0,119432 & 0,078628 \\ 0,073201 & 0,126482 & 0,087529 \end{vmatrix} = 9,08189 \cdot 10^{-7},$$

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} 0,066347 & 0,069553 & 0,110896 \\ 0,069553 & 0,077453 & 0,119432 \\ 0,073201 & 0,078628 & 0,126482 \end{vmatrix} = 8,45526 \cdot 10^{-7}$$

Тоді

$$c_1 = \frac{\Delta_1}{\Delta} = 0,624641, \quad c_2 = \frac{\Delta_2}{\Delta} = 0,504369, \quad c_3 = \frac{\Delta_3}{\Delta} = 0,469568. \quad (3.149)$$

Таким чином, з урахуванням (3.149) формула (3.143) приймає вигляд

$$y_m = 0,624641 \cdot x_1 + 0,504369 \cdot x_2 + 0,469568 \cdot x_3. \quad (3.150)$$

Враховуючи застосування логарифмування при обчисленнях формула (3.143) запишеться так

$$Q_m = q_1^{0,624641} \cdot q_2^{0,504369} \cdot q_3^{0,469568}. \quad (3.151)$$

На рис. 3.8 представлені графіки реальних значень якості електроенергії і обчислені по математичній моделі (3.151).

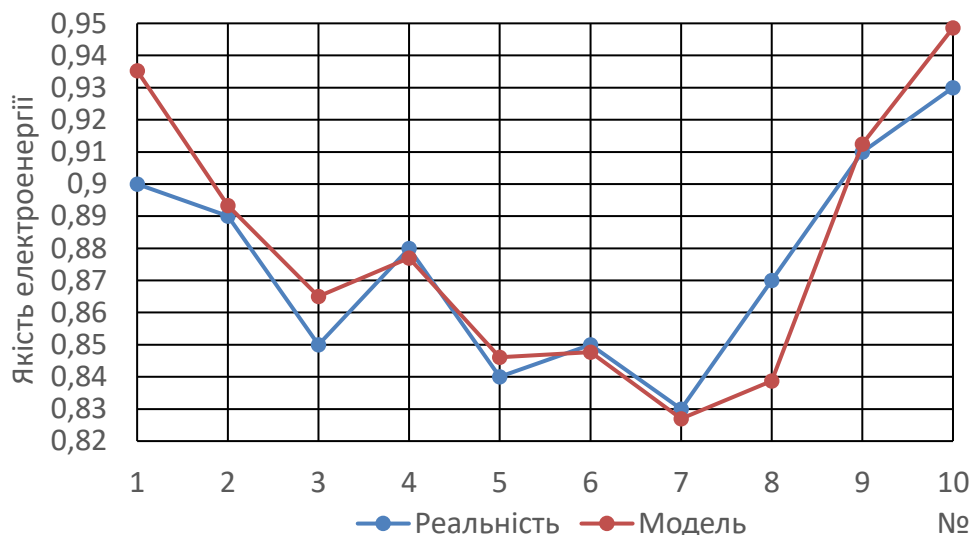


Рисунок 3.8 – Реальні обчислених по моделі (3.151) значення якості електроенергії і

Порівняння графіків, наведених на рис. 3.7, показує їхню досить хорошу близькість. Більше того, розрахований коефіцієнт парної кореляції становить величину

$$r_{QQ_m} = 0,923. \quad (3.152)$$

Згідно шкалі Чеддока, оскільки виконується нерівність

$$0,9 < r_{QQ_m} < 0,99,$$

то має місце «дуже високий» зв'язок між змінними.

Таким чином, формула (3.151) представляє трифакторну математичну модель за якістю електроенергії.

Користуючись формулою (3.141) можна записати відносну похибку загальної якості електроенергії в залежності від відносних похибок якостей електроенергії трифакторної математичної моделі за якістю електроенергії

$$\delta Q_m = 0,624641 \cdot \delta q_1 + 0,504369 \cdot \delta q_2 + 0,469568 \cdot \delta q_3,$$

де δq_1 – відносна похибка якості напруги U ,

δq_2 – відносна похибка якості частоти ω ,

δq_3 – відносна похибка якості форми кривої електричного струму χ .

Побудова багатофакторної математичної моделі якості електроенергії у вигляді статичної мультиплікативної моделі дала змогу дослідити вплив компонентів окремих складових ПЯЕ на загальну якість, і, з рештою, викреслити в узагальненому варіанті шляхи підвищення якості електроенергії, спираючись на певні локальні показники якості компонентів. Крім того, синтезована багатофакторна математична модель якості електроенергії дозволяє оцінити відносну помилку визначення загальної якості електроенергії як зважену суму відносних помилок складових її компонентів.

Як доповнення до вищенаведених результатів в Додатку Г надано вартісно-цільові аспекти оцінювання ПЯЕ.

3.3 Висновки до розділу 3

1. Оцінювання впливу рівнів коливань обсягів споживання електроенергії та рівнів відхилень напруги живлення від стандартизованих значень, дозволило визнати їх як носіїв випадкового характеру. Застосування методів теорії ймовірностей, зокрема поняття «викидів», дозволяє визначити рівні впливу цих відхилень на процес функціонування комплексу електропостачання - електроспоживання підземних залізодобувних рудників.

2. Нелінійність і стохастичність зміни окремо взятих показників якості електроенергії, як-то напруги живлення підземних електроспоживачів, проявляється тим більше, чим вищий рівень системи електропостачання розглядається. Тобто їх ступінь прямо залежить від агрегативно функціонуючих приймачів електроенергії підприємства: їх кількості та режимів роботи. Для показників якості напруги локальних електроприймачів рівень нелінійності і стохастичності знижується і в області рівнів їх роботи в

режимах наближених, або відповідних до номінальних, може підлягати процесу лінеаризації і вважатися практично детермінованим варіантом.

3. Сформована багатофакторна модель, щодо оцінювання варіативних змін комплексу показників якості електроенергії, дозволяє проводити пошук в напрямку мінімізації рівня сплати за споживаєму підземним гірничодобувним підприємством електроенергію, шляхом оптимізації величин складових показників якостей електроенергії при умові витримання їх на стандартних рівнях. Апробація запропонованої моделі відтворена на двох факторному варіанті моделі. Проведена ідентифікація її параметрів, згідно заданого статистичного матеріалу. Мінімізація рівня сплати за спожиту електроенергію на основі ідентифікованої двофакторної моделі дозволяє отримувати оптимальні очікуємі величини вартісних показників якості електроенергії.

4. Приклад чисельного розрахунку згідно з форматом запропонованої моделі обчислень, на основі реальних вхідних даних діючого підземного рудника на правах шахти № 9 «ПАТ АрселорМіттал Кривий Ріг», підтвердив здобутий результат, показавши, що рівень сплати за спожиту електроенергію, при витриманні показників якості в межах стандартів, зменшиться практично у два рази (Додаток Г). Такий підхід має вирішити проблему синергії якісно-вартісних характеристик, а системність варіанту підходу забезпечує всебічність дослідження якості електроенергії, як складної варіанту відкритої системи: електропостачання - електроспоживання.

РОЗДІЛ 4

РОЗРОБКА БАЗОВОГО ВАРІАНТУ СИСТЕМИ ОПЕРАТИВНОГО КЕРУВАННЯ РІВНЕМ НАПРУГИ ЖИВЛЕННЯ В ЕЛЕКТРОМЕРЕЖАХ ПІДЗЕМНИХ РУДНИКІВ

4.1 Обґрунтування способу компенсації рівнів відхилень напруги у внутрішніх системах електропостачання підземних рудників

Як зазначено в попередніх розділах даного наукового пошуку в комплексі ПЯЕ в умовах рудників з підземними способами видобутку ЗР домінують серед інших: відхилення напруги (ΔU) та розмах її змін (δU) від стандартизованих значень. У відповідності до рівня свого [67] рейтингу факт відхилень напруги та її розмах спричиняються різними факторами, як-то аварійними ситуаціями (перевантаженнями і короткими замиканнями), варіацією параметрів елементів електромережі, зміною споживання електроприймачів підземного рудника, наслідками атак на енергетичні об'єкти тощо. Як зазначалося в попередніх розділах даного наукового пошуку відхилення напруги призводять до негативного впливу на роботу чутливих споживачів, підключених до промислової електромережі на поверхні або всередині підземного рудника. Для мінімізації, а що краще, підтримання ПЯЕ на рівнях стандартизованих значень застосовується ряд технічних заходів [67, 85–91].

В класиці розробки, апробації та застосування способів та заходів, щодо підтримання на стандартизованих рівнях електричних напруг в СЕП промислових підприємств, відомо декілька спрямувань – способів рішень регулювання цим процесом [40]:

- зміна коефіцієнта трансформації силового трансформатора відповідної підстанції;
- зміна реактивної потужності, котра передається по ЛЕП у т. ч. зміною електричних параметрів компенсуючих пристроїв (ємності конденсаторів, регулюванням синхронних компенсаторів).

При цьому, зазначаючи достатньо широку «географію» практики застосування вищенаведених заходів в процес роботи електроенергетичних комплексів промислових підприємств, в тому числі гіничовидобувних, доцільно, водночас, відзначити не достатню для умов сьогодення потенційну наповненість «портфелю» цих заходів, і, перш за все, те, що стосується відсутності в технології їх функціонування необхідної адекватної природної реакції на стохастичність та швидкозмінність факторів впливу на процес підтримання реальних ПЯЕ на стандартизованих рівнях, як у локальних форматах (окремих показників), так і всього комплексу в цілому.

Для реалізації такого спрямування, в сучасному баченні рішень, обґрунтованим [85–91], є залучення до константної підтримки регламентованих ПЯЕ ДВН. Його функція [91] полягає у компенсуванні відхилень напруги, таких як провали, стрибки та гармоніки, гарантуючи, що чутливі до якості напруги споживачі отримують стабільне та безперебійне живлення. Такими споживачами в підземному руднику є вентилятори місцевого провітрювання, перетворювальні підстанції для контактної електромережі підземного транспорту, вібролюки, скреперні лебідки, бурильні верстати.

Динамічний відновлювач напруги (рис. 4.1) містить ряд основних складових компонентів, які забезпечують його функціонування в режимі компенсування відхилень напруги в електричній мережі підземного рудника. На схемі електроприймач підземного рудника з двигуном M_1 захищається пристроєм ДВН від відхилень напруги різного розмаху, а електроприймачі з двигунами M_2 і M_3 – ні.

Для компенсації відхилень напруги ДВН використовує накопичувач енергії. Він може бути представлений суперконденсаторами, акумуляторами або іншими схожими пристроями. Накопичена енергія з такого накопичувача використовується для генерації компенсаційної напруги, котра додається до мережевої напруги СЕП, для відновлення її значення до номінального рівня в

моменти, коли відбувається відхилення. На схемі накопичувач представлений конденсатором C .

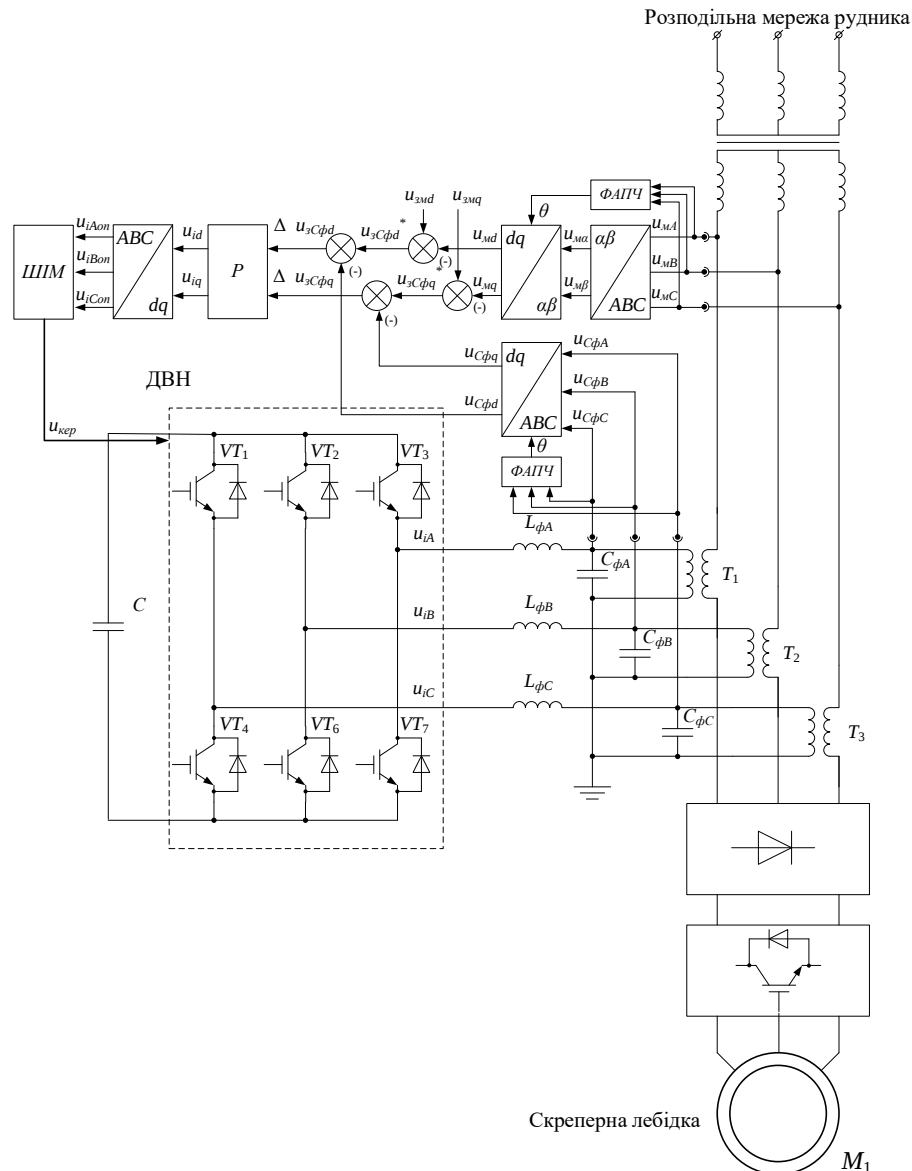


Рисунок 4.1 – Функціональна схема керування динамічним відновлювачем напруги

Оснoву ДВН становить силовий перетворювач– напівпровідниковий інвертор з широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ). На схемі (див. рис. 4.1) інвертор виконаний як трифазний міст з шістьома IGBT-транзисторами VT_1 – VT_6 . До складу пристрою входять трансформатори узгодження T_1 – T_3 , які забезпечують гальванічну розв'язку між ДВН і мережею, а також застосовуються для підвищення рівня компенсуючої напруги до значення,

необхідного для підтримування потрібного значення напруги живлення індивідуального підземного електроприймача.

Важливим елементом ДВН є фільтр, який усуває гармонійні спотворення напруги і струму, що виникають під час роботи силового перетворювача. Він запобігає погіршенню форми напруги в електромережі зумовлену роботою ДВН. Типово вона виконується на базі пасивних фільтрів. На рис. 4.1 показаний найбільш вживаний варіант фільтру, а саме трифазний LC-фільтр, побудований на елементах $L_{\phi A}C_{\phi A}$, $L_{\phi B}C_{\phi B}$, $L_{\phi C}C_{\phi C}$. Частота зрізання фільтру вибирається при проектуванні ДВН залежно від схеми напівпровідникового інвертора напруги.

Роботу ДВН координує САК, яка містить вимірювальні прилади для моніторингу параметрів напруги електромережі підземного рудника в реальному часі, регулятор (Р), який за певним алгоритмом керує IGBT-транзисторами інвертора для генерування відповідної форми компенсуючої напруги.

На рис. 4.1 показана базова схема керування ДВН на базі перетворювачів координат, яка працює таким чином. Виміряна трифазна мережева напруга u_{mA}, u_{mB}, u_{mC} перетворюється в двофазну $u_{m\alpha}, u_{m\beta}$, а потім в двофазну u_{md}, u_{mq} шляхом застосування перетворення Парка-Горєва. Для визначення кута обертання системи dq , залучається ФАПЧ. Далі суматорами визначається різниця між поточною мережевою u_{md}, u_{mq} напругою та еталонними нормованими значеннями u_{zmd}, u_{zmq} . Значення $u_{zC\phi d}^*$ і $u_{zC\phi q}^*$, які отримані, є еталонними для САК інвертором. $u_{zC\phi d}^*$ і $u_{zC\phi q}^*$ порівнюються з перетвореними в систему dq значеннями напруги $u_{C\phi A}, u_{C\phi B}, u_{C\phi C}$ виміряної на конденсаторах LC-фільтру, тобто $u_{C\phi d}, u_{C\phi q}$. Ці напруги є керованою величиною системи. Різниця між еталонними та виміряними значеннями напруги на фільтрі подається на регулятор (Р). Алгоритм роботи регулятора тут може бути різним від класичного ПІ, ПІД до нечіткого логічного

контролеру. Регулятор генерує опорні значення $u_{i\alpha}, u_{i\beta} \rightarrow u_{iAon}, u_{iBon}, u_{iCon}$ для широтно-імпульсного модулятора для керування IGBT-транзисторами інвертора.

В електромережі підземного рудника компенсація відхилень напруги може здійснюватися такими шляхами. Можна проводити стабілізацію напруги на стороні 6 кВ (див. рис. 4.2 а), що дозволить одночасно з залученням одного ДВН компенсувати відхилення на цілій групі споживачів.

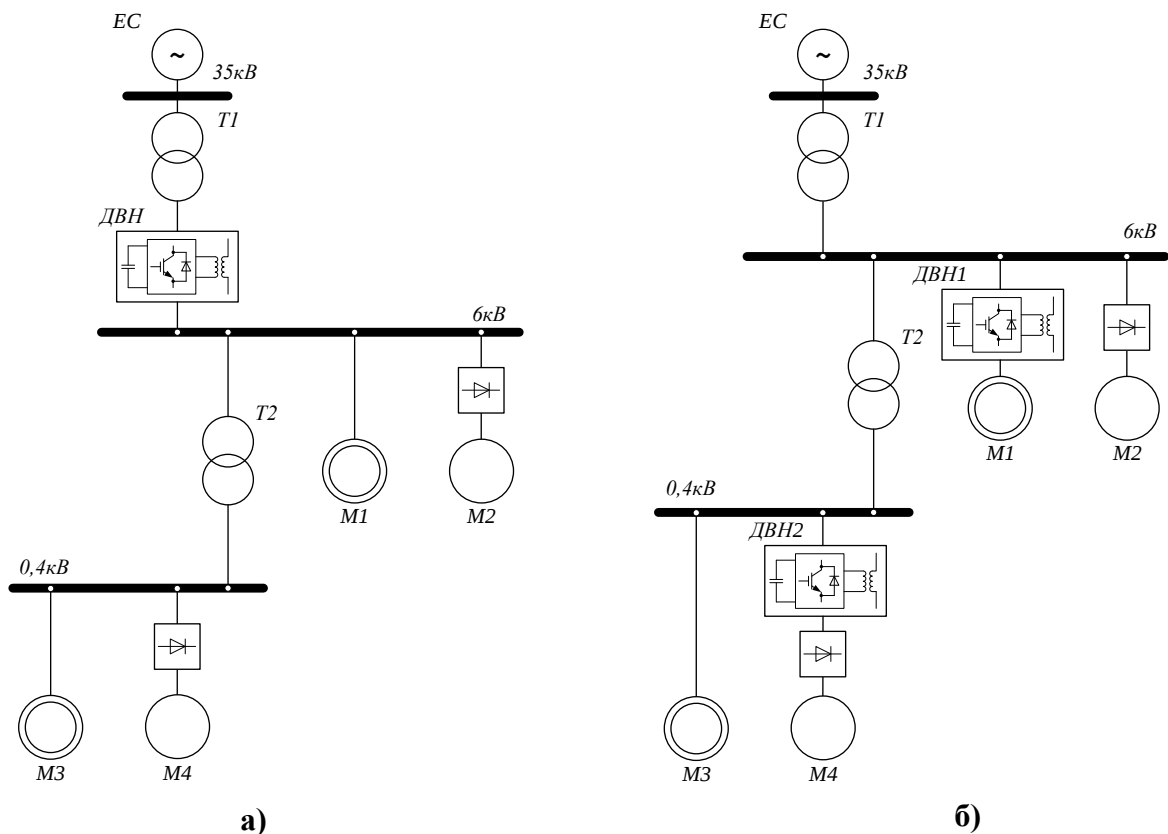


Рисунок 4.2 – Способи стабілізації напруги з задіянням динамічного відновлювача напруги в електромережах підземних рудників:

а) груповий; б) індивідуальний

Проте це потребує дуже потужного накопичувача енергії, який зважаючи на встановлену потужність електроприймачів в електромережі підземного рудника може бути дуже коштовним. Також відхилення напруги може з'явитися в інших ділянках електромережі, котрі розташовані після місця підключення ДВН і не охоплені його захистом. Це призведе до того, що

стабілізація напруги не відбудеться. Вирішити це питання дозволить встановлення додаткових ДВН, що зробить систему стабілізації напруги надмірною та ще дорожчою.

Використання ж індивідуальних ДВН (рис. 4.2 б) дозволить застосовувати їх для тих електроприймачів підземних рудників для котрих це потрібно. Такий варіант не потребує потужного накопичувача, великих фінансових витрат та дає змогу компенсувати відхилення напруги практично у точці приєднання споживача до системи електропостачання, що ліквідує залежність від того, в якій точці електромережі виникла аварійна ситуація, що до цього призвела. Тому у даному дослідженні буде розглянутий саме індивідуальне встановлення ДВН біля чутливого електроприймача.

У сьогоднішні поширеними є три способи компенсації відхилень напруги, що задіюються під час керування динамічним відновлювачем напруги. Вони визначають, яку фазу й амплітуду будуть мати вихідна напруга інвертора та напруга на споживачі електроенергії підземного рудника.

Перший спосіб [86, 87], векторна діаграма якого показана на рис. 4.3 а, полягає в тому, що напруга компенсації, яку видає інвертор є різницею між напругою електромережі до появи коливань напруги та напруги при відхиленні від номіналу. В результаті напруга на споживачеві має ту ж амплітуду й фазу, що й напруга джерела до зміни її якості. При цьому амплітуда компенсуючої напруги є доволі високою (але не найбільшою) ніж в інших способів відновлення напруги. Це потребує високих потужності й ємності накопичувача на стороні постійного струму. Тобто, по суті, іде підтримання напруги зовнішньої промислової електромережі, не вносячи жодних збурень в роботу електроприймача.

Амплітуда і фаза вихідної напруги інвертора ДВН визначаються так:

$$\begin{cases} U_{ДВНА} = \sqrt{2} \sqrt{U_H^2 + U_{мерА}^2 - 2U_H U_{мерА} \cos(\delta_A)}; \\ U_{ДВНВ} = \sqrt{2} \sqrt{U_H^2 + U_{мерВ}^2 - 2U_H U_{мерВ} \cos(\delta_B)}; \\ U_{ДВНС} = \sqrt{2} \sqrt{U_H^2 + U_{мерС}^2 - 2U_H U_{мерС} \cos(\delta_C)}. \end{cases} \quad (4.1)$$

Даний спосіб використовується при як симетричних, так і несиметричних відхиленнях трифазної напруги. Він більше підходить для підтримки напруги на електроприймачах чутливих до фазового зсуву.

Фазове автопідстроювання частоти в системах керування з таким способом відновлення напруги повинно бути виконане як на боці електромережі підземного рудника з видобутку залізної руди, так і на боці споживача. Окреслені фази мають бути синхронізовані. Тобто акцент робиться на фазах, а не на амплітудах.

Інший спосіб [87–89] полягає в тому, що вихідна напруга інвертора ДВН буде співпадати по фазі з напругою джерела після того як сталося відхилення напруги. В результаті напруга на споживачі підземного рудника буде сумою векторів напруги електромережі і динамічного відновлювача напруги, тобто амплітуда буде підтримана на потрібному рівні, а фаза буде зсунута відносно початкового стану, якщо звісно відхилення напруги до цього призвело. Векторна діаграма способу показана на рис. 4.3 б

Напруга компенсації у цьому разі визначається таким чином:

$$\begin{cases} U_{ДВНА} = \sqrt{2} |U_H - U_{мерA}|; \\ U_{ДВНВ} = \sqrt{2} |U_H - U_{мерB}|; \\ U_{ДВНС} = \sqrt{2} |U_H - U_{мерC}|. \end{cases} \quad (4.3)$$

При такому способі напруга на виході інвертора буде менше ніж при повній стабілізації описаній вище через те, що немає необхідності в компенсації зсуву фази. Такий спосіб застосовується для відновлення напруги на електроприймачах, що є нечутливими до фазових збурень.

І останній базовий спосіб має на меті мінімізацію споживання активної потужності від накопичувача (див. діаграму на рис. 4.3 в) [88–90].

Для чого вихідна напруга інвертора зміщується по фазі відносно струму споживача на 90 ел. град. Це надає можливість проводити перетік активної потужності під час компенсування відхилення напруги між електромережею і електроприймачем, та лише трохи з ДВН.

Це робиться для того, щоб мінімізувати ємність і потужність накопичувача енергії на боці постійного струму. Його можна застосовувати, коли вартість накопичувача дуже висока або якщо живлення накопичувача відбувається від генерації з відновлюваних джерел енергії.

Амплітуда і фаза вихідної напруги інвертора динамічного відновлювача напруги визначаються так:

$$\begin{cases} U_{ДВНА} = \sqrt{2} \sqrt{U_H^2 + U_{мерA}^2 - 2U_H U_{мерA} \cos(\delta_A + \theta)}; \\ U_{ДВНВ} = \sqrt{2} \sqrt{U_H^2 + U_{мерB}^2 - 2U_H U_{мерB} \cos(\delta_B + \theta)}; \\ U_{ДВНС} = \sqrt{2} \sqrt{U_H^2 + U_{мерC}^2 - 2U_H U_{мерC} \cos(\delta_C + \theta)}. \end{cases} \quad (4.4)$$

$$\begin{cases} \angle U_{ДВНА} = \arctan \left[\frac{U_H \sin(\phi + \theta) - U_{мерA} \sin(\phi - \delta_A)}{U_H \cos(\phi + \theta) - U_{мерA} \cos(\phi - \delta_A)} \right]; \\ \angle U_{ДВНВ} = \arctan \left[\frac{U_H \sin(\phi + \theta) - U_{мерB} \sin(\phi - \delta_B)}{U_H \cos(\phi + \theta) - U_{мерB} \cos(\phi - \delta_B)} \right]; \\ \angle U_{ДВНС} = \arctan \left[\frac{U_H \sin(\phi + \theta) - U_{мерC} \sin(\phi - \delta_C)}{U_H \cos(\phi + \theta) - U_{мерC} \cos(\phi - \delta_C)} \right]. \end{cases} \quad (4.5)$$

Разом з тим, спосіб не може застосовуватись для споживачів чутливих до кидків напруги, які з'являються при такому відновленні напруги, а також для споживачів з високим $\cos(\phi)$. Відзначаємо, що амплітуда вихідної напруги інвертора буде максимальною з усіх способів відновлення напруги.

Також існує ряд гібридних способів компенсувати відхилення напруги, що є комбінуванням трьох проаналізованих вище.

У даному дослідженні пропонується до задіяння перший розглянутий спосіб повної амплітудної і фазної компенсації, тому що він краще підходить до застосування в електромережі залізорудного підземного рудника, котра має нелінійних споживачів, що є дуже чутливими до збурення за фазою, зокрема, підземна перетворювальна підстанція для контактної мережі.

4.2 Моделювання динамічного відновлювача напруги

4.2.1 Модель динамічного відновлювача напруги в просторі станів

Модель ДВН в просторі станів потрібна для аналізу його динамічної поведінки, яка визначається взаємодією його компонентів: LC-фільтра, напівпровідникового перетворювача (інвертора напруги) та електромережі. ДВН додає компенсуючу напругу для підтримки стабільної напруги на споживачеві під час відхилень напруги, таких як просідання або стрибки.

Динамічна поведінка ДВН описується за допомогою законів Кірхгофа, які встановлюються по схемі заміщення (рис. 4.4).

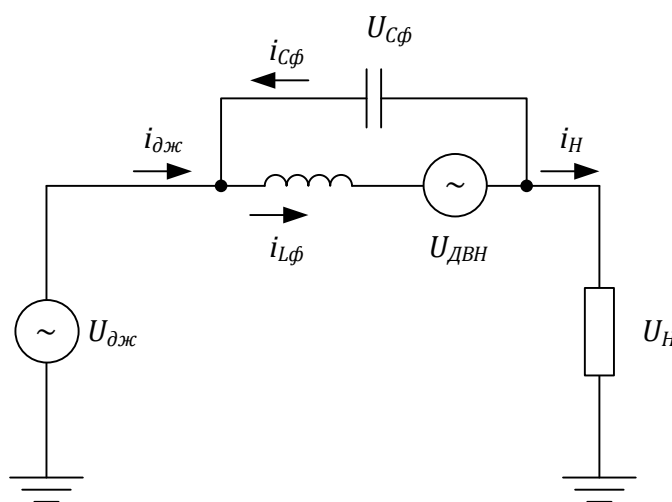


Рисунок 4.4 – Схема заміщення однієї фази динамічного відновлювача напруги

Послідовна котушка індуктивності та шунтуючий конденсатор утворюють LC-фільтр. Напруга на котушці індуктивності визначається індуктивністю і швидкістю зміни струму котушки індуктивності. Струм через конденсатор пов'язаний з ємністю і швидкістю зміни напруги на конденсаторі [91]. Ці взаємозв'язки виражаються диференціальними рівняннями, які описують динаміку системи оперативної стабілізації напруги.

Змінними стану для ДВН обираємо напругу на конденсаторі ($u_{C\phi}$) та струм індуктивності ($i_{L\phi}$) [92]. Напруга на конденсаторі відображає вихідну напругу споживача, а струм індуктивності – струм, що протікає через LC-

фільтр. Керуючим входом системи є компенсуюча напруга, що генерується інвертором напруги, в той час як входом збурення є струм електроприймача підземного рудника.

Використовуючи другий закон Кірхгофа:

$$\begin{cases} u_{iA} = u_{R\phi A} + u_{L\phi A} + u_{C\phi A}; \\ u_{iB} = u_{R\phi B} + u_{L\phi B} + u_{C\phi B}; \\ u_{iC} = u_{R\phi C} + u_{L\phi C} + u_{C\phi C}. \end{cases} \quad (4.6)$$

Звідки, враховуючи, що $u_{R\phi} = i_{L\phi} R_{\phi}$ і $u_{L\phi} = L_{\phi} \frac{di_{L\phi}}{dt}$:

$$\begin{cases} u_{iA} = i_{L\phi A} R_{\phi} + L_{\phi} \frac{di_{L\phi A}}{dt} + u_{C\phi A}; \\ u_{iB} = i_{L\phi B} R_{\phi} + L_{\phi} \frac{di_{L\phi B}}{dt} + u_{C\phi B}; \\ u_{iC} = i_{L\phi C} R_{\phi} + L_{\phi} \frac{di_{L\phi C}}{dt} + u_{C\phi C}. \end{cases} \quad (4.7)$$

де L_{ϕ} – індуктивність LC-фільтра;

R_{ϕ} – паразитний опір котушки індуктивності LC-фільтра.

$u_{C\phi}$ – напруга на конденсаторі.

Перетворюючи маємо:

$$\begin{cases} \frac{di_{L\phi A}}{dt} = -\frac{R_{\phi}}{L_{\phi}} i_{L\phi A} - \frac{1}{L_{\phi}} u_{C\phi A} + \frac{1}{L_{\phi}} u_{iA}; \\ \frac{di_{L\phi B}}{dt} = -\frac{R_{\phi}}{L_{\phi}} i_{L\phi B} - \frac{1}{L_{\phi}} u_{C\phi B} + \frac{1}{L_{\phi}} u_{iB}; \\ \frac{di_{L\phi C}}{dt} = -\frac{R_{\phi}}{L_{\phi}} i_{L\phi C} - \frac{1}{L_{\phi}} u_{C\phi C} + \frac{1}{L_{\phi}} u_{iC}. \end{cases} \quad (4.8)$$

Використовуючи перший закон Кірхгофа вузла 2 на схемі рис. 4.4:

$$\begin{cases} i_{L\phi A} = i_{C\phi A} + i_{HA}; \\ i_{L\phi B} = i_{C\phi B} + i_{HB}; \\ i_{L\phi C} = i_{C\phi C} + i_{HC}. \end{cases} \quad (4.9)$$

Враховуючи, що $i_{C\phi} = C_\phi \frac{du_{C\phi}}{dt}$:

$$\begin{cases} i_{L\phi A} = C_\phi \frac{du_{C\phi A}}{dt} + i_{HA}; \\ i_{L\phi B} = C_\phi \frac{du_{C\phi B}}{dt} + i_{HB}; \\ i_{L\phi C} = C_\phi \frac{du_{C\phi C}}{dt} + i_{HC}. \end{cases} \quad (4.10)$$

де C_ϕ – ємність LC-фільтра.

Перетворивши маємо:

$$\begin{cases} \frac{du_{C\phi A}}{dt} = \frac{1}{C_\phi} i_{L\phi A} - \frac{1}{C_\phi} i_{HA}; \\ \frac{du_{C\phi B}}{dt} = \frac{1}{C_\phi} i_{L\phi B} - \frac{1}{C_\phi} i_{HB}; \\ \frac{du_{C\phi C}}{dt} = \frac{1}{C_\phi} i_{L\phi C} - \frac{1}{C_\phi} i_{HC}. \end{cases} \quad (4.11)$$

Поєднавши системи рівнянь (4.8) і (4.11) отримуємо модель динамічного відновлювача напруги в системі АВС:

$$\begin{cases} \frac{di_{L\phi A}}{dt} = -\frac{R_\phi}{L_\phi} i_{L\phi A} - \frac{1}{L_\phi} u_{C\phi A} + \frac{1}{L_\phi} u_{iA}; \\ \frac{di_{L\phi B}}{dt} = -\frac{R_\phi}{L_\phi} i_{L\phi B} - \frac{1}{L_\phi} u_{C\phi B} + \frac{1}{L_\phi} u_{iB}; \\ \frac{di_{L\phi C}}{dt} = -\frac{R_\phi}{L_\phi} i_{L\phi C} - \frac{1}{L_\phi} u_{C\phi C} + \frac{1}{L_\phi} u_{iC}; \\ \frac{du_{C\phi A}}{dt} = \frac{1}{C_\phi} i_{L\phi A} - \frac{1}{C_\phi} i_{HA}; \\ \frac{du_{C\phi B}}{dt} = \frac{1}{C_\phi} i_{L\phi B} - \frac{1}{C_\phi} i_{HB}; \\ \frac{du_{C\phi C}}{dt} = \frac{1}{C_\phi} i_{L\phi C} - \frac{1}{C_\phi} i_{HC}. \end{cases} \quad (4.12)$$

Перетворимо (4.12) в систему dq0:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{di_{L\phi d}}{dt} &= -\frac{R_\phi}{L_\phi} i_{L\phi d} + \omega i_{L\phi q} - \frac{1}{L_\phi} u_{C\phi d} + \frac{1}{L_\phi} u_{id}; \\ \frac{di_{L\phi q}}{dt} &= -\omega i_{L\phi d} - \frac{R_\phi}{L_\phi} i_{L\phi q} - \frac{1}{L_\phi} u_{C\phi q} + \frac{1}{L_\phi} \cdot u_{iq}; \\ \frac{du_{C\phi d}}{dt} &= \frac{1}{C_\phi} i_{L\phi d} + \omega u_{C\phi q} - \frac{1}{C_\phi} i_{Ld}; \\ \frac{du_{C\phi q}}{dt} &= \frac{1}{C_\phi} i_{L\phi q} - \omega \cdot u_{C\phi d} - \frac{1}{C_\phi} i_{Lq}. \end{aligned} \right. \quad (4.13)$$

Переписавши систему рівнянь (4.13):

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{di_{L\phi d}}{dt} &= -\frac{R_\phi}{L_\phi} i_{L\phi d} + \omega i_{L\phi q} - \frac{1}{L_\phi} u_{C\phi d} + 0 \cdot u_{C\phi q} + \frac{1}{L_\phi} u_{id} + \\ &\quad + 0 \cdot u_{iq} + 0 \cdot i_{Ld} + 0 \cdot i_{Lq}; \\ \frac{di_{L\phi q}}{dt} &= -\omega i_{L\phi d} - \frac{R_\phi}{L_\phi} i_{L\phi q} + 0 \cdot u_{C\phi d} - \frac{1}{L_\phi} u_{C\phi q} + 0 \cdot u_{Cq} + \\ &\quad + 0 \cdot u_{id} + \frac{1}{L_\phi} \cdot u_{iq} + 0 \cdot i_{Ld} + 0 \cdot i_{Lq}; \\ \frac{du_{C\phi d}}{dt} &= \frac{1}{C_\phi} i_{L\phi d} + 0 \cdot i_{L\phi q} + 0 \cdot u_{C\phi d} + \omega u_{C\phi q} - \frac{1}{C_\phi} i_{Ld} + 0 \cdot i_{Lq}; \\ \frac{du_{C\phi q}}{dt} &= 0 \cdot i_{L\phi d} + \frac{1}{C_\phi} i_{L\phi q} - \omega \cdot u_{C\phi d} + 0 \cdot u_{C\phi q} + 0 \cdot i_{Ld} - \frac{1}{C_\phi} i_{Lq}. \end{aligned} \right. \quad (4.14)$$

Модель ДВН можна представити у просторі станів:

$$\begin{cases} x' = Ax + Bu + B_d d; \\ y = Cx + Du + D_d d, \end{cases} \quad (4.15)$$

де X – вектор стану (наприклад, напруга на конденсаторі, струм котушки індуктивності);

U – керуючий вхід (напруга компенсації ДВН через інвертор напруги);

d – вхідне збурення (просідання/зростання напруги);

y – вихід (наприклад, напруга на навантаженні);

A – матриця стану:

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{R_\phi}{L_\phi} & \omega & -\frac{1}{L_\phi} & 0 \\ -\omega & -\frac{R_\phi}{L_\phi} & 0 & -\frac{1}{L_\phi} \\ \frac{1}{C_\phi} & 0 & 0 & \omega \\ 0 & \frac{1}{C_\phi} & -\omega & 0 \end{bmatrix}, \quad (4.16)$$

B – матриця входу:

$$B = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_\phi} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_\phi} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (4.17)$$

B_d – матриця збурення:

$$B_d = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ -\frac{1}{C_\phi} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{C_\phi} \end{bmatrix}, \quad (4.18)$$

C – матриця виходу:

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (4.19)$$

Відзначаємо, що значення усіх змінних стану, вхідних та вихідних дій системи можуть бути зафіксовані вимірювальними пристроями, тому САК не вимагає застосування спостерігачів стану, що спрощує її будову та налагодження, додатково це перевіримо шляхом визначення матриці спостерігаємості.

4.2.2 Визначення параметрів динамічного відновлювача напруги

Розглянемо варіант застосування ДВН для дотримання потрібної якості електроенергії на одному зі споживачів підземного рудника. Візьмемо типовий електроприймач – скреперну лебідку (рис. 4.1) типу ЛС-30 (потужністю 30 кВт).

Номинальна потужність ДВН для стабілізації напруги живлення лебідки обирається з урахуванням відхилення напруги від стандартизованого значення, тобто рівня необхідної компенсуючої напруги, та коефіцієнта потужності електроприймача. Напруга на виході ДВН додається до напруги СЕП за рахунок послідовного включення пристрою в електромережу рудника, чим досягається підтримування напруги живлення лебідка на бажаному рівні.

Обчислення проводимо з наступних початкових даних. Лінійну напругу в електромережі рудника змінного струму з частотою 50 Гц беремо рівною 400 В, коефіцієнт потужності двигуна скреперної лебідки – $\cos \varphi_n = 0,9$.

Тоді повна потужність електроприймача [93]:

$$S_n = \frac{P_n}{\cos \varphi_n} = \frac{30}{0,9} = 33,33 \text{ кВА}. \quad (4.20)$$

Визначення потужності ДВН робимо у першу чергу виходячи з необхідності досягнення цілі роботи – стабілізації напруги, тобто від можливого відхилення її значення від стандартизованого рівня. Приймаємо, що найбільше відхилення напруги становитиме $U_{np} = 0,4U_{ном}$, тобто:

$$\Delta U = (1 - U_{np}) U_n = 0,6 \cdot 400 = 240 \text{ В}. \quad (4.21)$$

Тоді компенсуюча напруга ДВН:

$$U_{ДВН} = U_n - \Delta U = 400 - 240 = 160 \text{ В}. \quad (4.22)$$

Так як ДВН включається в електромережу послідовно, тоді потужність дорівнює:

$$S_{ДВН} = \frac{U_{ДВН}}{U_n} S_n = \frac{160}{400} 33,33 = 13,33 \text{ кВА}. \quad (4.23)$$

Додамо 10...20 % запас за потужністю, щоб урахувати можливі втрати або перевантаження. У результаті приймаємо потужність ДВН на рівні 15 кВА, щоб була можливість досягти потрібної якості напруги при її відхиленні на $U_{np} = 0,4U_{ном}$.

Також важливою стадією вибору параметрів ДВН є встановлення параметрів згладжуючого LC-фільтра для забезпечення синусоїдальної форми вихідної напруги інвертора, що покращить якість загальної стабілізованої напруги живлення лебідки [94].

Для виконання розрахунку необхідно припустимо, що напруга в ланці постійного струму інвертора становить 700 В, а частота ШІМ дорівнює 10 кГц. Номінальна потужність ДВН, як було визначено складає 15 кВА. Допустима реактивна потужність ємності LC-фільтра має бути не більшою ніж 10 % номінальної потужності ДВН, тобто 1,5 кВАр.

Частота зрізу LC-фільтра має становити 10% частоти ШІМ. Це забезпечує якісне виключення гармонік, що створює інвертор. Беремо частоту зрізу 1000 Гц.

Частота зрізу LC-фільтра:

$$f_c = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{L_\phi C_\phi}}. \quad (4.24)$$

Звідки виразивши:

$$L_\phi C_\phi = \frac{1}{(2\pi f_c)^2 47 \cdot 10^{-6}} = . \quad (4.25)$$

І підставляючи $f_c = 1000 \text{ Гц}$ отримаємо:

$$L_\phi C_\phi = \frac{1}{(2\pi \cdot 10^3)^2} = 2,53 \cdot 10^{-8} \text{ Гн} \cdot \text{Ф}. \quad (4.26)$$

Реактивна потужність ємності:

$$Q_C = \omega C_\phi U^2. \quad (4.27)$$

де ω – кутова частота мережі.

Ємність конденсатора LC-фільтра обмежена максимальною реактивною потужністю 1,5 кВАр, тому отримаємо:

$$C_{\phi} \leq \frac{Q_{\max}}{\omega U^2} = \frac{1,5 \cdot 10^3}{2\pi \cdot 50 (230)^2} = 90,26 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}. \quad (4.28)$$

Приймаємо $C_{\phi} = 47 \text{ мкФ} \leq 90,26 \text{ мкФ}$, що задовольняє вимогам (4.28).

Використовуючи значення ємності та формулу (4.25) визначимо індуктивність LC-фільтру:

$$L_{\phi} = \frac{1}{(2\pi f_c)^2 C_{\phi}} = \frac{1}{(2\pi \cdot 10^3)^2 47 \cdot 10^{-6}} = 0,539 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}. \quad (4.29)$$

Беремо $L_{\phi} = 0,5 \text{ мГн}$.

Підставимо значення індуктивності та ємності у (4.24) та перевіримо правильність обчислень:

$$f_c = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{L_{\phi} C_{\phi}}} = \frac{1}{2 \cdot 50} \sqrt{\frac{1}{0,5 \cdot 10^{-3} \cdot 47 \cdot 10^{-6}}} = 1,004 \text{ кГц}. \quad (4.30)$$

Це значення близьке до встановленого 1 кГц, що підтверджує правильність обчислень. LC-фільтр з параметрами $L_{\phi} = 0,5 \text{ мГн}$; $C_{\phi} = 47 \text{ мкФ}$ має забезпечувати ефективне зниження гармонік в системі оперативної стабілізації напруги індивідуального підземного електроприймача з ДВН.

4.2.3 Моделювання розімкненої системи динамічного відновлювача напруги

Перевіряємо модель динамічного відновлювача напруги на керованість та спостережність [95, 96].

Обчислимо матрицю керованості та встановімо ранг:

$$\begin{aligned}
K &= \begin{bmatrix} B & AB & A^2B & A^3B \end{bmatrix} = \\
&= \begin{bmatrix} 2 \cdot 10^3 & 0 & 0 & 0 & -4 \cdot 10^6 & 6,3 \cdot 10^5 \\ 0 & 2 \cdot 10^3 & 0 & 0 & -6,3 \cdot 10^5 & -4 \cdot 10^6 \\ 0 & 0 & -2,1 \cdot 10^4 & 0 & 4,3 \cdot 10^7 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -2,1 \cdot 10^4 & 0 & 4,3 \cdot 10^7 \\ 4,3 \cdot 10^7 & 0 & -7,7 \cdot 10^{10} & -2,5 \cdot 10^9 & -8,5 \cdot 10^{10} \\ 0 & 4,3 \cdot 10^7 & 2,5 \cdot 10^9 & -7,7 \cdot 10^{10} & -2,7 \cdot 10^{10} \\ 0 & -6,6 \cdot 10^7 & -8,5 \cdot 10^{10} & 2,7 \cdot 10^{10} & 9,1 \cdot 10^{11} \\ 6,6 \cdot 10^7 & 0 & -2,7 \cdot 10^{10} & -8,5 \cdot 10^{10} & 0 \\ 2,7 \cdot 10^{10} & 3,3 \cdot 10^{14} & -7,03 \cdot 10^{13} & -1,7 \cdot 10^{15} & -8 \cdot 10^{13} \\ -8,5 \cdot 10^{10} & 7,03 \cdot 10^{13} & 3,3 \cdot 10^{14} & 8 \cdot 10^{13} & -1,7 \cdot 10^{15} \\ 0 & -1,7 \cdot 10^{15} & -8 \cdot 10^{13} & -1,8 \cdot 10^{15} & 8,5 \cdot 10^{14} \\ 9,1 \cdot 10^{11} & 8 \cdot 10^{13} & -1,7 \cdot 10^{15} & -8,5 \cdot 10^{14} & -1,8 \cdot 10^{15} \end{bmatrix}; \\
\text{rang}(K) &= 4.
\end{aligned} \tag{4.31}$$

Ранг матриці відповідає числу станів, тому модель повністю керована.

$$\begin{aligned}
C &= \begin{bmatrix} C \\ CA \\ CA^2 \\ CA^3 \end{bmatrix} = \\
&= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \cdot 10^4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \cdot 10^4 \\ 2,1 \cdot 10^8 & 0 & 0 & 3,1 \cdot 10^6 \\ 0 & 2,1 \cdot 10^8 & -3,1 \cdot 10^6 & 0 \\ -4,3 \cdot 10^{11} & 1,3 \cdot 10^{11} & -4,3 \cdot 10^{11} & 0 \\ -1,3 \cdot 10^{11} & -4,3 \cdot 10^{11} & 0 & -4,3 \cdot 10^{11} \\ -8,3 \cdot 10^{15} & -4 \cdot 10^{14} & 8,5 \cdot 10^{14} & 4 \cdot 10^{14} \\ 4 \cdot 10^{14} & -8,3 \cdot 10^{15} & 4 \cdot 10^{14} & 8,5 \cdot 10^{14} \end{bmatrix}; \\
\text{rang}(C) &= 4.
\end{aligned} \tag{4.32}$$

Ранг матриці відповідає числу станів, тому модель і повністю спостерігаєма.

На рис. 4.5 і у табл. 4.1 – 4.2 приведені результати симуляції роботи просторово-станної моделі ДВН з визначеними у п. 4.2.2 параметрами інвертора та LC-фільтру.

Одразу уточнимо, що канали, що зв'язують однакові вхідну і вихідну величину, по вісі d або вісі q мають ідентичні характеристики динаміки.

Таблиця 4.1 – Час перехідного процесу розімкненої системи динамічного відновлювача напруги (секунд)

	u_{Cfd}	u_{Cfq}
u_{id}	0,003069	0,005933
u_{iq}	0,005933	0,003069
i_{Hd}	0,003319	0,005764
i_{Hq}	0,005764	0,003319

Модель розімкненої системи ДВН показує нерівномірний розподіл динамічних властивостей між каналами, що свідчить про їх різну реакцію на вхідні дії та збурення, котрі визначаються умовами роботи електромережі підземного рудника. Відсутність зворотного зв'язку означає відсутність можливості корекції, тому динаміка моделі (4.15) визначається тільки її внутрішніми характеристиками – першочергово параметрами LC-фільтра ДВН і зовнішніми діями. Така система має фіксовані часові параметри перехідних процесів (ПП), залежні від фізичних характеристик компонентів, що утворюють ДВН, зокрема, характеристик окремих компонентів, котрі задають співвідношення між імпедансами гілок схеми ДВН (рис. 4.4).

Поведінка ДВН передбачувана, але водночас є менш гнучкою. Будь-які зміни вихідного сигналу є прямим наслідком вхідної дії і схеми за якою створюється просторово-станна модель, а також умов роботи електромережі підземного рудника, що визначають збурення.

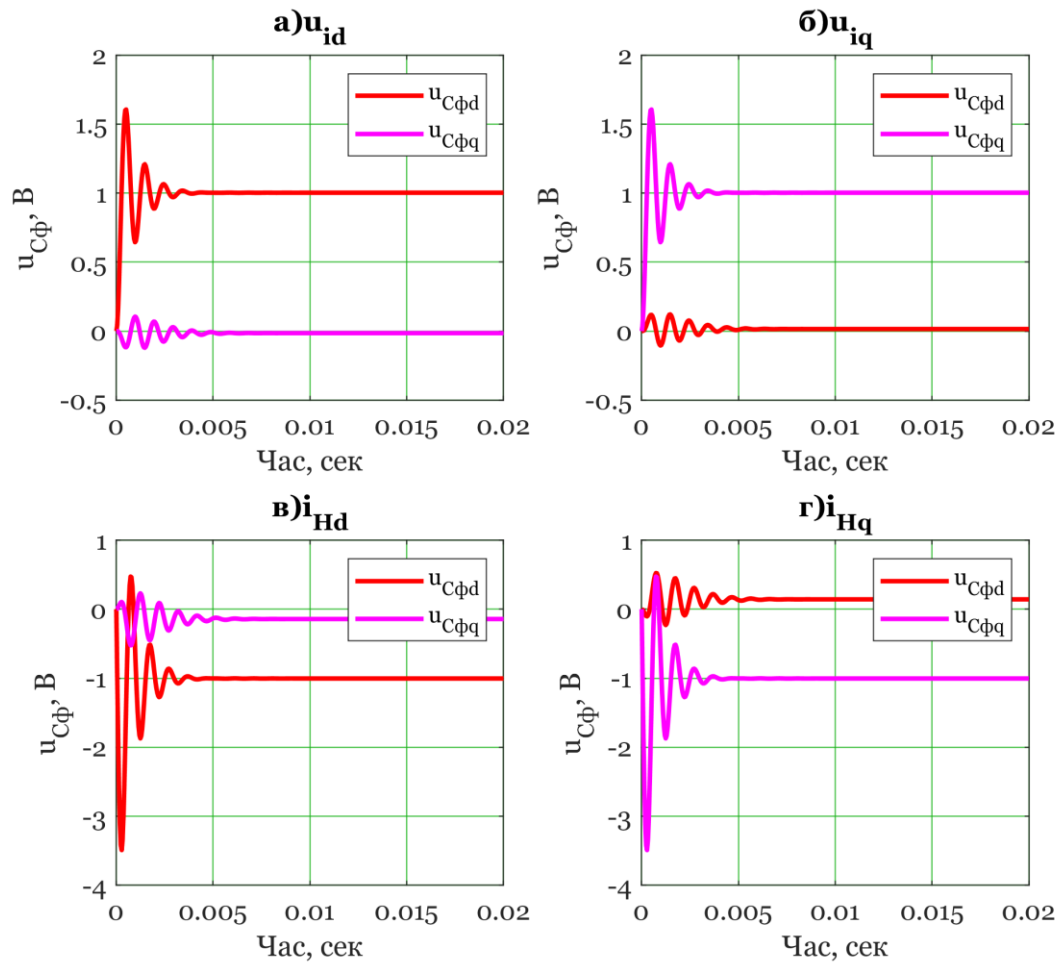


Рисунок 4.5 – Перехідний процес в розімкненій системі при одиничній східчастій функції: а) канал «напруга інвертора d – напруга на конденсаторі фільтру»; б) канал «напруга інвертора q – напруга на конденсаторі фільтру»; в) канал «струм навантаження d – напруга на конденсаторі фільтру»; г) канал «струм навантаження q – напруга на конденсаторі фільтру»

Різниця у часах ПП між каналами вказує на відсутність однорідності динамічної поведінки системи, що, як говорилося, обумовлено відмінностями в співвідношеннях між електричними параметрами для кожного каналу. Канали $u_{id} - u_{c\phi d}$; $u_{iq} - u_{c\phi q}$ із найменшим часом ПП демонструють найшвидшу реакцію, що вказує на меншу інерційність. Канали $u_{id} - u_{c\phi q}$; $u_{iq} - u_{c\phi d}$, у яких найбільший час ПП (на 93,32 % вищий ніж у $u_{id} - u_{c\phi d}$; $u_{iq} - u_{c\phi q}$, тобто практично у 2 рази), має повільнішу динаміку, що є

результатом більшого опору, індуктивності або ємності. Канали $i_{Hd} - u_{c\Phi d}; i_{Hq} - u_{c\Phi q}; i_{Hd} - u_{c\Phi q}; i_{Hq} - u_{c\Phi d}$ за швидкодією займають проміжне положення за часом реакції на збурення. При чому, час ПП каналів $i_{Hd} - u_{c\Phi d}; i_{Hq} - u_{c\Phi q}$ нижчий за $i_{Hd} - u_{c\Phi q}; i_{Hq} - u_{c\Phi d}$ і є трохи більшим (усього на 8,41%) ніж у каналів $u_{id} - u_{c\Phi d}; u_{iq} - u_{c\Phi q}$. Час ПП каналів $i_{Hd} - u_{c\Phi q}; i_{Hq} - u_{c\Phi d}$ на 73,55% вищий на ніж у $i_{Hd} - u_{c\Phi d}; i_{Hq} - u_{c\Phi q}$, але на 2,91% менший ніж у $u_{id} - u_{c\Phi q}; u_{iq} - u_{c\Phi d}$.

Наявність помітного розриву в часі ПП між швидшими та повільнішими каналами вказує на можливі проблеми із синхронізацією каналів моделі ДВН. Це може негативно вплинути на якість роботи ДВН в цілому, якщо він використовується тоді, коли потрібна узгоджена реакція на зовнішні дії.

Таблиця 4.2 – Перерегулювання розімкненої системи динамічного відновлювача напруги (%)

	$u_{c\Phi d}$	$u_{c\Phi q}$
u_{id}	60,1409	713,8296
u_{iq}	713,8296	60,1409
i_{Hd}	247,741	266,6595
i_{Hq}	266,6595	247,741

Відсутність САК у моделі означає, що невідповідність в ПП незмінна. САК не може її зкорегувати. Зміна досягається лише підбором параметрів схеми заміщення ДВН.

Зважаючи на характер ПП в розімкненій системі, подальший аналіз має містити оцінювання частотних характеристик каналів, аналіз полюсів передавальної функції каналів для встановлення причин різної швидкодії.

Найменше перерегулювання спостерігається в каналах $u_{id} - u_{C\phi d}$ і $u_{iq} - u_{C\phi q}$, де воно становить 60,14%. Це вказує на добре згасаючий ПП із незначним рівнем коливань, що є результатом наявності внутрішнього демпфування. Канали $u_{iq} - u_{C\phi d}$ і $u_{id} - u_{C\phi q}$ демонструють аномально високий рівень перерегулювання 713,83%, що на перший погляд може вказувати на сильну нестійкість у ПП, яка призводить значних коливань. Вони можуть тривати дуже довго до досягнення встановленого значення. Проте дивлячись на графік $u_{C\phi d}$ на рис. 4.5 а) і $u_{C\phi q}$ на рис. 4.5 б) можна побачити, що таке число обумовлене тим, що усталене значення становить усього 0,0148 В, а сам ПП хоч і коливальний, але згасаючий за 0,005933 секунди.

Канали $i_{Hd} - u_{C\phi d}$; $i_{Hq} - u_{C\phi q}$; $i_{Hd} - u_{C\phi q}$; $i_{Hq} - u_{C\phi d}$ з перерегулюваннями 247,71% та 266,66% також мають значні коливання, проте не настільки великого рівня, як у вищеописаних. Таке перевищення усталеного значення обумовлюється близькістю полюсів передавальної функції до уявної осі. Це властивість систем, що мають низький рівень затухання ПП. Відсутність САК у даній моделі не дозволяє виправити цей ефект, тому коливання можуть бути тривалими. У реальних електромережах підземних рудників, де буде задіяний такий ДВН, це може викликати перевантаження в роботі підземного електрообладнання.

Загальний характер динаміки розімкненої системи ДВН вказує на суттєво різні демпфуючі властивості каналів, що знову ж таки, як вже зазначалося, обумовлено відмінностями в співвідношеннях між електричними параметрами для кожного каналу, що визначає різну інтенсивність ПП. Модель ДВН є розімкненою, її поведінка не буде змінюватись керуючими діями, тому значні перевищення перерегулювання не можуть бути виправлені.

Аналіз моделі показує, що потрібна або оптимізації внутрішніх параметрів, як-то опір, ємність, індуктивність в схемі заміщення ДВН, або ж введення САК, яка могла б забезпечити кращу ЯПП. Якщо ж необхідне

вирівнювання характеристик каналів, тоді досліджується частотні характеристики просторово-станної моделі ДВН та залучаються методи зменшення резонансних ефектів, які є причиною нестійкості нестійкості.

Далі побудуємо логарифмічні амплітудно-фазові частотні характеристики (рис. 4.6 і рис. 4.7).

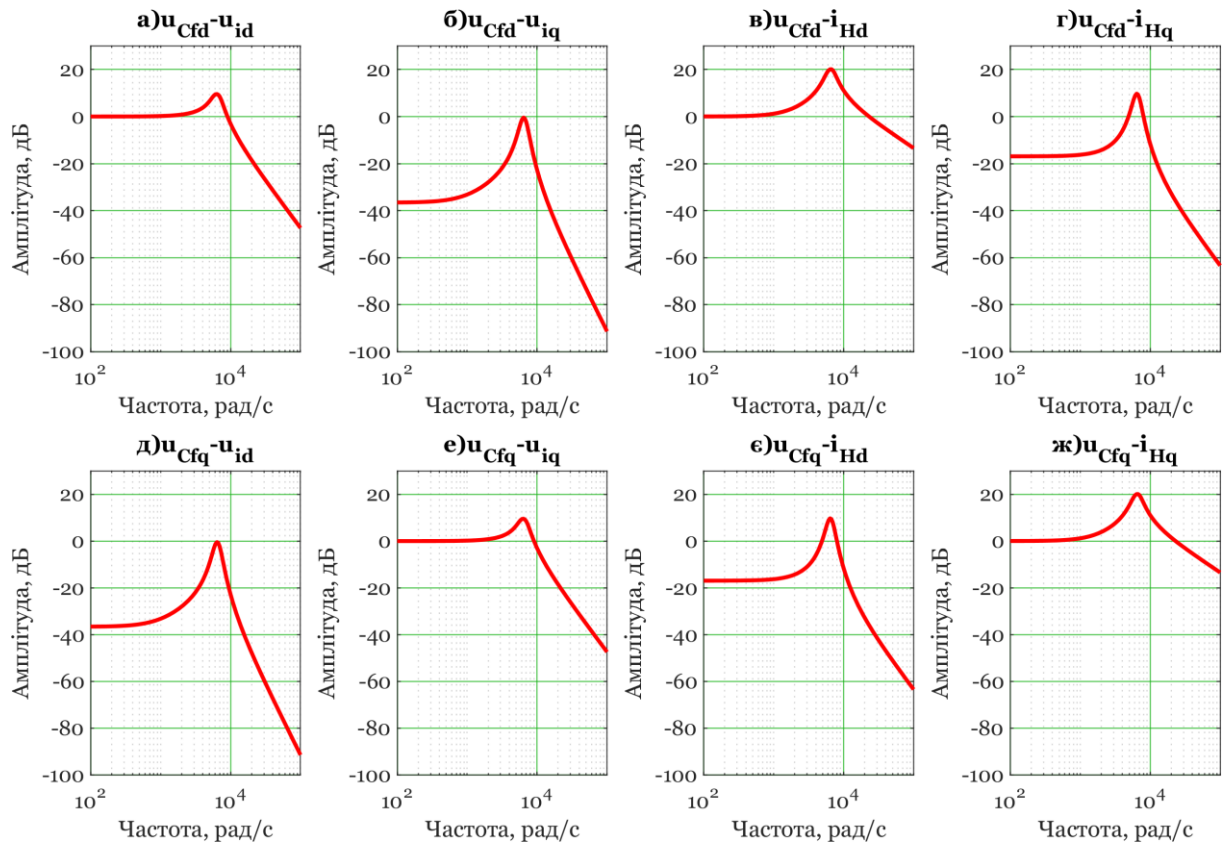


Рисунок 4.6 – Амплітудно-частотні характеристики моделі динамічного відновлювача напруги

З них видно, що в цілому модель по більшості каналів керування є стійкою. Проте канали $u_{Cfd} - i_{Hd}$, $u_{Cfd} - i_{Hq}$ і $u_{Cfq} - i_{Hq}$ є нестійкими, якщо не будуть застосовані в системі з негативним зворотнім зв'язком. Запас по амплітуді і по фазі для каналів $u_{Cfd} - i_{Hd}$, $u_{Cfq} - i_{Hq}$ становить $-0,04$ дБ і $-89,57$ град., для $u_{Cfd} - i_{Hq}$ $-9,66$ дБ і $105,63$ град.

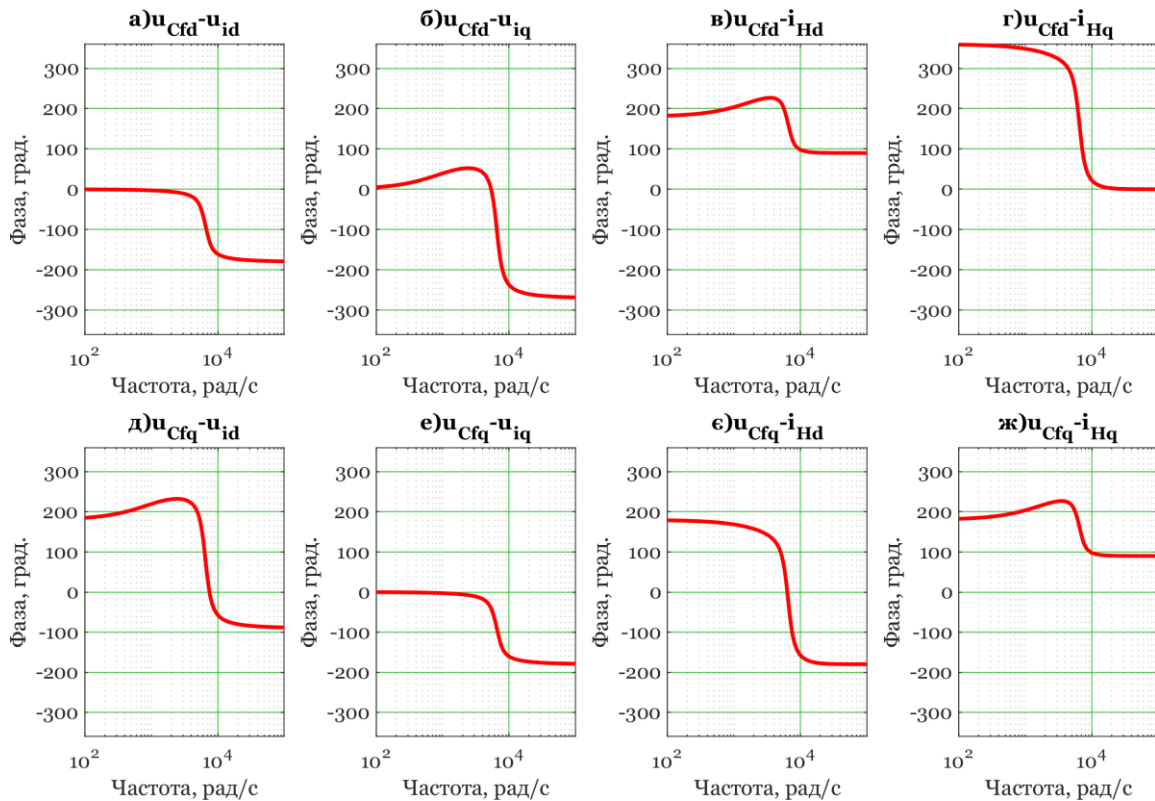


Рисунок 4.7 – Фазо-частотні характеристики моделі динамічного відновлювача напруги

Амплітудо-частотні характеристики (рис. 4.6) містять резонансні частоти, що підтверджує коливання під час ПП. Для каналів $u_{Cfd} - u_{iq}$, $u_{Cfd} - i_{Hq}$, $u_{Cfq} - u_{id}$, $u_{Cfq} - u_{iq}$ вона становить 6416,7 рад/с, для $u_{Cfd} - u_{id}$, $u_{Cfq} - u_{iq}$ – 6360,4 рад/с, для $u_{Cfd} - i_{Hd}$, $u_{Cfq} - i_{Hq}$ – 6686 рад/с. Тобто резонансна частота відрізняється не дуже значно.

4.3 Керування динамічним відновлювачем напруги зі зворотнім зв'язком за станом моделі

САК зі зворотним зв'язком за станом – це спосіб керування, який використовує змінні стану системи для регулювання виходу системи з врахуванням збурень. На відміну від традиційних методів, таких як П-, ПІ- і ПІД-регулятори, зворотний зв'язок за станом дозволяє безпосередньо керувати динамікою системи, покращуючи характеристики ЯПП [97, 98].

При застосуванні САК зі зворотним зв'язком за станом вхідний сигнал визначається за допомогою матриці підсилення зворотного зв'язку, яка змінює змінні стану системи для досягнення бажаної ЯПП. Цей закон керування має вигляд рівняння, де вхідний сигнал керування є зваженою сумою змінних стану. Правильно підібравши матрицю підсилення, можна розмістити полюси ДВН в потрібних місцях, щоб досягти якісних динамічних характеристик.

Матриця підсилення зворотного зв'язку розраховується за допомогою таких методів, як розміщення полюсів [99, 100] або методів оптимального керування, таких як ЛКР.

При розміщенні полюсів характеристичне рівняння системи модифікується шляхом підбору коефіцієнтів підсилення, які гарантують, що полюси замкненого контуру знаходяться в стабільних і добре демпфованих областях комплексної площини.

При проєктуванні на основі ЛКР оптимальна матриця коефіцієнтів підсилення обчислюється шляхом мінімізації певної функції, яка врівноважує відхилення стану і зусилля керування. ЛКР-підхід забезпечує систематичний спосіб досягнення оптимальної ЯПП шляхом розв'язання алгебраїчного рівняння Ріккати.

Однією з головних переваг САК зі зворотним зв'язком за станом у ДВН є його можливість забезпечувати швидку і точну компенсацію відхилень мережевої напруги з мінімальним перерегулюванням і часом ПП. Безпосереднє використання станів системи дозволяє покращити демпфування коливань і підвищити стійкість до збурень. Крім того, гнучкість у завданні матриці підсилення зворотного зв'язку дозволяє налаштовувати САК на різні умови експлуатації та збурення в електромережі.

Незважаючи на свої переваги, САК зі зворотним зв'язком за станом вимагає чітко визначеної моделі системи з точним виміром значень станів. Воно вимагає ретельного проєктування і розуміння ЯПП, яку потрібно досягти. Зважаючи на те, що у пункті 4.2 було побудовано якісну модель ДВН,

то в даному випадку такий вид керування може бути застосована до цього пристрою.

Рівняння для розрахунку керувань потрібне для проектування САК зі зворотним зв'язком за станом:

$$u = -Kx, \quad (4.33)$$

де K – матриця підсилення зворотного зв'язку за станом.

Рівняння замкненої системи тоді має вигляд:

$$x' = (A - BK)x; \quad (4.34)$$

$$(A - BK) =$$

$$= \begin{bmatrix} -\frac{R_\phi}{L_\phi} & \omega & -\frac{1}{L_\phi} & 0 \\ -\omega & -\frac{R_\phi}{L_\phi} & 0 & -\frac{1}{L_\phi} \\ \frac{1}{C_\phi} & 0 & 0 & \omega \\ 0 & \frac{1}{C_\phi} & -\omega & 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{1}{L_\phi} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_\phi} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} & k_{14} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} & k_{24} \end{bmatrix}, \quad (4.35)$$

Так як, модель ДВН повністю спостережна і керована, тому розглянемо застосування методу розміщення полюсів для розрахунку коефіцієнтів підсилення зворотного зв'язку.

Встановимо полюси системи таким чином:

$$p = \begin{bmatrix} (-4,9 + 8,4j) \cdot 10^3 \\ (-4,9 - 8,4j) \cdot 10^3 \\ (-4,9 + 7,7j) \cdot 10^3 \\ (-4,9 - 7,7j) \cdot 10^3 \end{bmatrix}. \quad (4.36)$$

Тоді матриця підсилення зворотного зв'язку:

$$K = \begin{bmatrix} 3,8999 & 0,30995 & 0,955289 & 0,071382 \\ -0,31569 & 3,9 & -0,072705 & 1,200375 \end{bmatrix}. \quad (4.37)$$

Проведемо симуляцію роботи моделі ДВН зі зворотнім зв'язком за станом. У табл. 4.3 і табл. 4.4 наведено показники ЯПП в замкненій системі. Відзначаємо суттєве покращення показників, як часу ПП, так і перерегулювання. Так, наприклад для каналів $u_{id} - u_{C\phi d}$ і $u_{iq} - u_{C\phi q}$ для яких час ПП був найбільшим у моделі і становив 0,005933 відбулося зменшення часу на 78,03% до 0,0013034 с. Найбільше на 89,1% з 0,005764 сек до 0,0006274 сек зменшився час ПП для каналу $i_{Hq} - u_{C\phi d}$, найменше – на 73,04% з 0,003069 сек до 0,0008275 сек для каналу $u_{iq} - u_{C\phi q}$.

Таблиця 4.3 – Час перехідного процесу замкненої системи динамічного відновлювача напруги (секунд)

	$u_{C\phi d}$	$u_{C\phi q}$
u_{id}	0,000635	0,0013034
u_{iq}	0,0013034	0,0008275
i_{Hd}	0,0008053	0,0008227
i_{Hq}	0,0006274	0,0007736

Таблиця 4.4 – Перерегулювання замкненої системи динамічного відновлювача напруги (%)

	$u_{C\phi d}$	$u_{C\phi q}$
u_{id}	13,53	66,21
u_{iq}	66,21	15,82
i_{Hd}	23,87	15,5
i_{Hq}	14,18	28,77

Ще більше ніж час ПП зменшилося перерегулювання в замкненій системі, проте воно повністю не усунулося при розглянутому розміщенні

поліосів. Так для каналів $i_{Hd} - u_{Cfd}$ і $i_{Hq} - u_{Cfq}$ воно скоротилося на 94,2% і 94,6% відповідно. Для каналів $u_{id} - u_{Cfd}$, $u_{iq} - u_{Cfq}$ і $i_{Hd} - u_{Cfq}$ скорочення становить біля 90%. Найменше перерегулювання скоротилося для каналу $u_{iq} - u_{Cfd}$ на 73,7%.

Відзначаємо, що для деяких каналів по вісям d і q показники не співпадають, як це було в розімкненій моделі ДВН.

Незважаючи, що суттєво покращується ЯПП з точки зору часу ПП і перерегулювання, проте, як видно з рис. 4.8 з'являється висока усталена похибка (близько 50%).

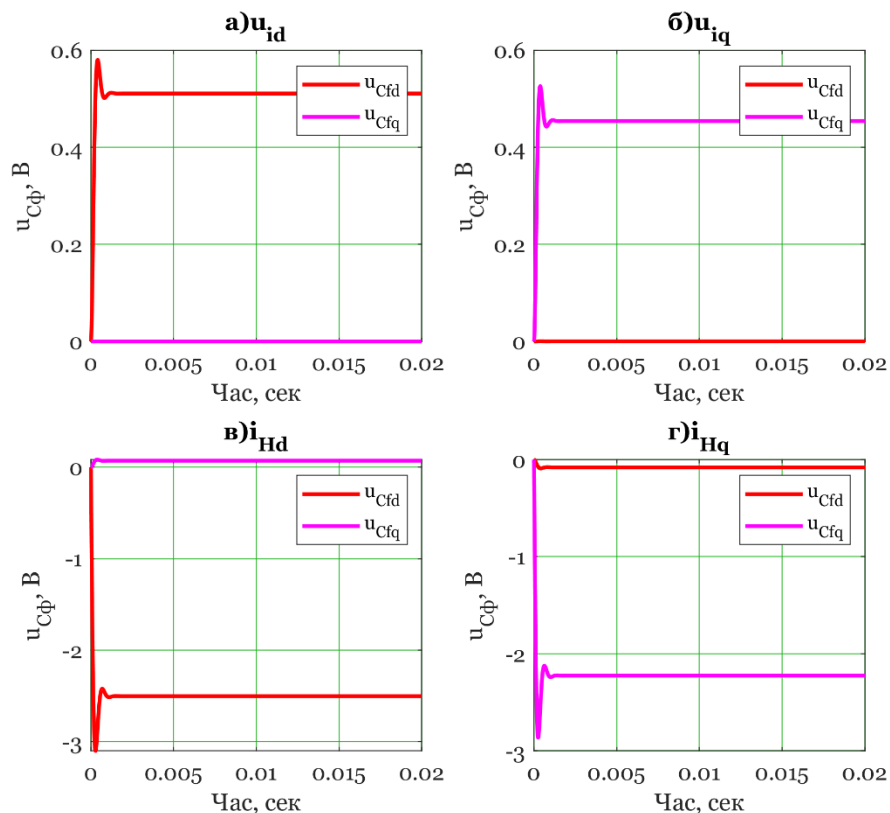


Рисунок 4.8 – Перехідний процес в замкненій системі зі зворотнім зв'язком за станом при одиничній східчастій функції: а) канал «напруга інвертора d – напруга на конденсаторі фільтру»; б) канал «напруга інвертора q – напруга на конденсаторі фільтру»; в) канал «струм навантаження d – напруга на конденсаторі фільтру»; г) канал «струм навантаження q – напруга на конденсаторі фільтру»

Отже, матриця коефіцієнтів або потребує покращення, або в фінальний варіант САК повинна бути введена коригуюча ланка, що буде доводити значення виходів системи по вісям d і q до потрібного рівня. Звісно, що другий варіант більш зручний.

Зважаючи на те, що розміщення полюсів виконується в ручному режимі, тому для поліпшення якості ПП можна застосувати оптимізаційні методи, як-то ЛКР.

4.4 Висновки до розділу 4

1. Обґрунтовано необхідність застосування динамічного відновлювача напруги для стабілізації напруги у випадку її відхилень від регламентованих значень з різним розмахом в електричних мережах підземних рудників. Проаналізовано основні способи включення динамічного відновлювача напруги в електромережу підземного рудника, що дозволило прийняти до використання індивідуальну схему підвищення якості напруги на одному чутливому електроприймачі для якого відхилення напруги найбільш критичні. Визначено основні способи компенсації відхилень напруги серед яких прийнято до застосування той, що керує і амплітудою, і фазою напруги живлення.

2. Створено просторово-станну модель динамічного відновлювача напруги. Змінними стану для моделі взято напругу на конденсаторі, яка додається до мережевої, та струм індуктивності LC-фільтру. Керуючим входом системи є компенсуюча напруга, що генерується інвертором напруги, в той час як входом збурення є струм електроприймача. В моделі використовуються перетворення Парка-Горєва. Запропонована модель використовується для аналізу перехідних процесів та оптимізації параметрів системи автоматизованого керування для забезпечення ефективної роботи динамічного відновлювача напруги.

3. Здійснено моделювання роботи розімкненої системи динамічного відновлювача напруги для оцінювання власних характеристик системи.

Проаналізувавши часові та частотні характеристики системи визначено, що просторово-станна модель динамічного відновлювача напруги є динамічною системою другого порядку, тому має коливальний характер перехідних процесів з високим перерегулюванням. Деякі канали, як-то «струм навантаження» – «напруга на конденсаторі LC-фільтру», показали, що без застосування зворотного зв'язку їх перехідні процеси будуть нестійкими.

4. Досліджено динаміку динамічного відновлювача напруги із застосуванням замкненої за станом системи керування. Визначено матрицю підсилення в зворотному зв'язку шляхом розміщення полюсів в області стійкості системи. Проведене моделювання підтвердило поліпшення показників якості керування рівнем напруги живлення електроприймача підземного рудника, а саме зменшення перерегулювання максимально на 94,6% та зменшення часу перехідних процесів максимально на 89,1%. Разом з тим, все ще великі значення перерегулювань, що перевищують стандартизовані 5% вказують на необхідність застосування оптимізаційних методів для визначення матриці підсилення в зворотному зв'язку.

РОЗДІЛ 5. ФОРМУВАННЯ ВАРІАНТУ ОПЕРАТИВНОГО КЕРУВАННЯ РІВНЕМ НАПРУГИ ЖИВЛЕННЯ В ЕЛЕКТРОМЕРЕЖАХ ПІДЗЕМНИХ РУДНИКІВ

Форматуючи в коректному варіанті наукові положення, котрі були викладені в попередніх розділах даного дослідження з метою визначення їх системоутворюючої квінтесенції для отримання кінцевого рішення розбудови системи керування процесом стабілізації рівнів напруги живлення на клемах приймачів ЕЕ, де цей негатив відображається на характеристиках їх роботи, зазначимо, що встановлений факт стохастичності споживання електроенергії даними видами гірничовидобувних підприємств все ж містить свої відмінні в цьому процесі складові – споживачі котрі функціонують, або в нормальних режимах, або не працюють. В першому випадку вони споживають відповідно стабільну ЕЕ в, наближенні, або у відповідності до номінальної паспортної, в другому не споживають взагалі.

Тобто процес споживання ними ЕЕ не стохастичний, а циклічний. Цей факт дещо спрощує тактику розбудови схеми керування. Якщо до цього додати те, що загальна кількість споживачів ЕЕ взагалі, а різновидність їх типів і видів зокрема, в умовах ведення підземних гірничих робіт, то логіка в технічному баченні рішення спрощуються. Проте, достатньо очікуваний ефект і тут, і в будь якому іншому варіанті може бути досягнуто як при транспортуванні, так і на клемах споживачів ЕЕ лише при розробці комплексної структури СЕП відповідного управлінського алгоритму адаптивно-оперативного керування процесом підтримання ПЯЕ на стандартних рівнях.

Отже, зважаючи на вищевикладене, керування процесом стабілізації напруги на індивідуальному електроприймачі можливо здійснити шляхом лінеаризації роботи ДВН навколо певної робочої точки, після чого до отриманої лінійної моделі може бути застосований регулятор лінійного типу.

5.1 Обґрунтування та логіка застосування принципу лінійно-квадратичного регулювання для керування динамічним відновлювачем напруги

Метод розташування полюсів для визначення матриці підсилення зворотного зв'язку САК ДВН, як показали результати приведені у розділі 4, може бути застосований при керуванні стабілізатором напруги в електромережі підземного рудника, проте цей варіант не позбавлений недоліків. Найбільш суттєвим з цих недоліків є «ручний підхід» до процесу налаштування регулятора. У такому випадку підбір полюсів стає методом «спроб і помилок», який призводить до великих витрат часу потрібних для встановлення коефіцієнтів, що обумовляють досягнення регламентованих показників ЯПП. Керуючі дії, що при цьому отримуються можуть змінюватись дуже різко через відсутність обмеження на швидкість їх зміни. У наслідку це може викликати відхилення напруги, як на ДВН, окремих ланках електромережі, так і всій СЕП підземного рудника. Тобто вплив використання ДВН на електроприймачів буде ще гіршим, ніж без нього.

Як вже зазначалося раніше, одне з головних завдань при розробці ДВН такого формату для умов електромереж підземних залізничних підприємств полягає в тому, що стабілізація напруги у внутрішній СЕП підприємства має бути забезпечена під впливом потенційно непрогнозованих збурюючих факторів. При чому, їх вплив на певні ПЯЕ може бути різноманітним. Такі перспективи для роботи ДВН показують, що налаштування ЛКР шляхом, наприклад, тільки розташування полюсів, не завжди дасть можливість врахування всіх динамічних властивостей системи, котрою потрібно керувати. А це знижує стійкість САК і погіршує ЯПП.

Загальновизнаним [101], [102] для застосування в подібних САК є варіант зі зворотнім зв'язком за станом – метод ЛКР. Цей метод відноситься до класу оптимізаційних способів налаштування регуляторів, тому процес його застосування для підтримання стабільного рівня напруги в підземних СЕП в динамічних умовах є обґрунтованим. ЛКР дозволяє досягнути

потрібного стану ДВН одночасно компенсуючи непрогнозовані збурення шляхом визначення необхідних керуючих дій.

Окрім цього, ЛКР мінімізує квадратичний критерій похибки, який включає члени як для відхилень стану, так і керувань. Це дозволяє забезпечити потрібну точність стабілізації напруги (стану) без різких її змін через обмеження. Налаштовуючи вагові матриці ЛКР досягається бажана реакція на непрогнозовані збурення, не створюючи при цьому надмірного навантаження як на фільтр або інвертор ДВН, так і на індивідуальний електроприймач. Аналіз якості напруги в СЕП реального підземного залізорудного рудника показав, що робота ДВН у них вимагатиме частого – оперативного формату підтримування локального ПЯЕ – відхилення напруги та розмаху їх зміни. Якщо в цей час зміна керуючої дії буде надмірною, то це приведе зниження надійності електрообладнання ДВН і конкретного підземного споживача ЕЕ.

Як доповнення до вищезазначеного, відзначимо, що перевагою ЛКР в контексті керування ДВН є також здатність працювати з просторово-станими моделями з багатьма вхідними і вихідними змінними. Для реалізації системи керування ДВН з координатними перетворювачами, модель пристрою, повинна включати складові величин через які описується динаміка функціонування ДВН, як-то напруга на конденсаторі LC-фільтру, струм у навантаженні тощо, у вісях координат d і q . Це робить дану модель саме багатомірною, придатною до задіяння ЛКР.

Окрім того, ЛКР забезпечує адаптування до коливань параметрів електромережі або ДВН шляхом постійного переобчислення квадратичного критерію похибки без суттєвих обчислювальних складнощів. Тим паче, що СЕП підземних рудників схильні до непрогнозованих змін умов навантаження або імпедансу ліній електропередачі. Це також є перевагою ЛКР над традиційними САК, які не завжди можуть адаптуватися до змінних умов роботи через складність налаштування або взагалі при відсутності технічної можливості це зробити.

Підбір значень вагових матриць ЛКР можна також здійснювати оптимізаційними способами за критеріями, які дозволять отримати бажані показники ЯПП. Таким чином, досягається необхідна динаміка ДВН – мінімізується перерегулювання, час ПП або похибка усталеного режиму. Це дає можливість знизити вплив роботи ДВН на ПП в електромережі підземного рудника.

Таким чином, застосування методу ЛКР для керування ДВН в умовах підземного рудника є обґрунтованим. Проте потрібно провести широкий аналіз впливу його налаштувань на ЯПП при оперативній стабілізації напруги.

5.2 Аналіз функціональних можливостей лінійно-квадратичного регулятора динамічного відновлювача напруги в умовах систем електропостачання підземних рудників

Для покращення характеристик динамічної системи (4.15), як-то перерегулювання, яке було визначено найбільш незадовільним показником ЯПП розімкненої системи ДВН використовуємо метод ЛКР. Схема САК ДВН з ЛКР у зворотному зв'язку за станом представлена на рис. 5.1. Жовтим кольором на рисунку показується об'єкт – просторово-станна модель. Блок керування виділений червоним кольором. ЛКР використовуючи спеціальні

вагові матриці W_x і W_y , дані про стану
$$\begin{bmatrix} u_{C\phi d} \\ u_{C\phi q} \\ i_{L\phi d} \\ i_{L\phi q} \end{bmatrix},$$
 вхід
$$\begin{bmatrix} 3_{u_{C\phi d}} \\ 3_{u_{C\phi q}} \end{bmatrix},$$
 збурення
$$\begin{bmatrix} i_{Hd} \\ i_{Hq} \end{bmatrix}$$
 і

вихід
$$\begin{bmatrix} u_{C\phi d} \\ u_{C\phi q} \end{bmatrix}$$
 визначає оптимальну матрицю K у зворотному зв'язку.

У САК з ЛКР потрібно отримати керування (4.35), яке мінімізує функціонал вигляду:

$$J = \int_0^{\infty} [x^T(t)W_x x(t) + u^T(t)W_u u(t)] dt, \quad (5.1)$$

де W_x – вагова матриця змінних стану симетрична додатна піввизначена, $k \times k$;

W_u – вагова матриця керувань симетрична додатна визначена, $n \times n$.

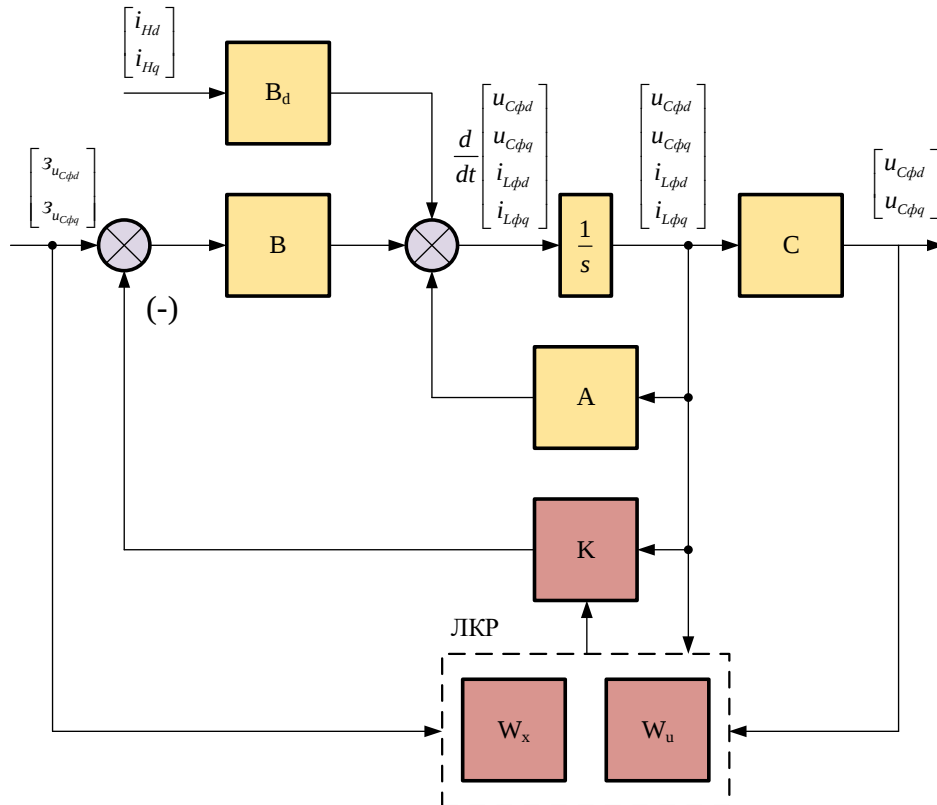


Рисунок 5.1 – Функціональна схема керування динамічним відновлювачем напруги з лінійно-квадратичним регулятором

Для рішення оптимізаційної задачі визначимо функцію Гамільтона:

$$H = x^T W_x x + u^T W_u u + \lambda (Ax + Bu), \quad (5.2)$$

де $\lambda(t)$ – множник Лагранжа.

Необхідні умови для знаходження оптимального рішення:

Рівняння з множником Лагранжа:

$$\dot{\lambda}(t) = -\frac{\partial H}{\partial x} = -Qx - A^T \lambda. \quad (5.3)$$

Рівняння оптимального керування:

$$\frac{\partial H}{\partial u} = 2W_u u + B^T \lambda = 0. \quad (5.4)$$

Звідки:

$$u = -\frac{1}{2} W_u^{-1} B^T \lambda. \quad (5.5)$$

Далі рішення відбувається через розв'язок APP.

Припустимо, що оптимізаційний функціонал має квадратичний вигляд:

$$V(x) = x^T S x, \quad (5.6)$$

де S – симетрична додатньо визначена матриця.

Множник Лагранжа:

$$\lambda = \frac{\partial V}{\partial x} = 2Sx. \quad (5.7)$$

Підставляємо в (4.35):

$$u = -W_u^{-1} B^T Sx. \quad (5.8)$$

Рівняння замкнутої системи набуває вигляду:

$$\frac{dx}{dt} = (A - BW_u^{-1} B^T S)x. \quad (5.9)$$

Підставимо в рівняння (5.7):

$$2S(A - BW_u^{-1} B^T S)x = -Qx - A^T (2Sx). \quad (5.10)$$

Виключаючи x :

$$SA + A^T S - SBW_x^{-1} B^T S + Q = 0. \quad (5.11)$$

Помінявши місцями перший і другий доданок отримаємо APP:

$$A^T S + SA - SBW_x^{-1} B^T S + Q = 0. \quad (5.12)$$

Розв'язок APP (5.12) дає матрицю S через яку знаходиться оптимальна матриця підсилення зворотного зв'язку за станом:

$$K = W_x^{-1} B^T S, \quad (5.13)$$

що дає оптимальний закон керування:

$$u = -Kx = W_x^{-1} B^T Sx. \quad (5.14)$$

Встановимо випадковим чином значення вагових матриць змінних стану та керуючих дій:

$$W_x = \begin{bmatrix} 50 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 50 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 10 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 10 \end{bmatrix}; W_u = \begin{bmatrix} 15 & 0 \\ 0 & 15 \end{bmatrix}. \quad (5.15)$$

Рішення АРР (5.12):

$$S = \begin{bmatrix} 0,001683135 & 0 & 0,00218246 & 0 \\ 0 & 0,001683135 & 0 & 0,00218246 \\ 0,00218246 & 0 & 0,00224769 & 0 \\ 0 & 0,00218246 & 0 & 0,00224769 \end{bmatrix}. \quad (5.16)$$

Розташування полюсів:

$$p = \begin{bmatrix} (-3,24418 + 6,9783334j) \cdot 10^3 \\ (-3,24418 - 6,9783334j) \cdot 10^3 \\ (-3,24418 + 6,3500015j) \cdot 10^3 \\ (-3,24418 - 6,3500015j) \cdot 10^3 \end{bmatrix}. \quad (5.17)$$

Матриця підсилення зворотного зв'язку за станом:

$$K = \begin{bmatrix} 2,2441801 & 0 & 2,2909944 & 0 \\ 0 & 2,2441801 & 0 & 2,2909944 \end{bmatrix}. \quad (5.18)$$

Виконаємо симуляцію роботи ДВН з ЛКР при підставленні матриці (5.18) в (5.14).

У табл. 5.1, табл. 5.2 і на рис. 5.2 наведено характеристики ЯПП в замкненій системі. Значення матриць (5.15) в ЛКР дає нам покращену ЯПП, якщо порівнювати з розімкненою системою. Про що свідчить співставлення даних з табл. 5.1 і 5.2 з табл. 4.1 і 4.2, а також графіків ПП з рис. 5.1 і 4.5. Так час ПП за каналами $u_{id} - u_{C\phi d}$ і $u_{iq} - u_{C\phi q}$ знижується на 63,38%, $i_{Hq} - u_{C\phi d}$ і $i_{Hd} - u_{C\phi q}$ – на 64,41%, $u_{iq} - u_{C\phi d}$ і $u_{id} - u_{C\phi q}$ – на 72,66% і найбільше за каналами $i_{Hd} - u_{C\phi d}$ і $i_{Hq} - u_{C\phi q}$ – на 73,56% з 0,003319 сек до 0,0010112 сек.

Таблиця 5.1 – Час перехідного процесу (секунд) замкненої системи динамічного відновлювача напруги з матрицями (5.15)

	$u_{C\phi d}$	$u_{C\phi q}$
u_{id}	0,001124	0,002039
u_{iq}	0,002039	0,001124
i_{Hd}	0,0010112	0,002391
i_{Hq}	0,002391	0,0010112

Також знижується й перерегулювання. Найбільше це відбулося для каналів $u_{iq} - u_{C\phi d}$ і $u_{id} - u_{C\phi q}$. Залучення ЛКР для керування ДВН дало зменшення цього показника на 84,95%, з 713% до 107,42%. Дещо гірше перерегулювання знизилося для каналів $i_{Hd} - u_{C\phi d}$ і $i_{Hq} - u_{C\phi q}$ але становило 82,95%, тобто з 247,74% до 42,19%.

Таблиця 5.2 – Перерегулювання (%) замкненої системи динамічного відновлювача напруги з матрицями (5.15)

	$u_{C\phi d}$	$u_{C\phi q}$
u_{id}	21.31	107.42
u_{iq}	107.42	21.31
i_{Hd}	42.19	227.57
i_{Hq}	227.57	42.19

Майже не вплинув ЛКР на перерегулювання у каналах $i_{Hq} - u_{C\phi d}$ і $i_{Hd} - u_{C\phi q}$ порівняно з базовим варіантом покращення напруги в електромережі підземних рудників. Зниження становило усього 14,66%, з 266% до 227,57%.

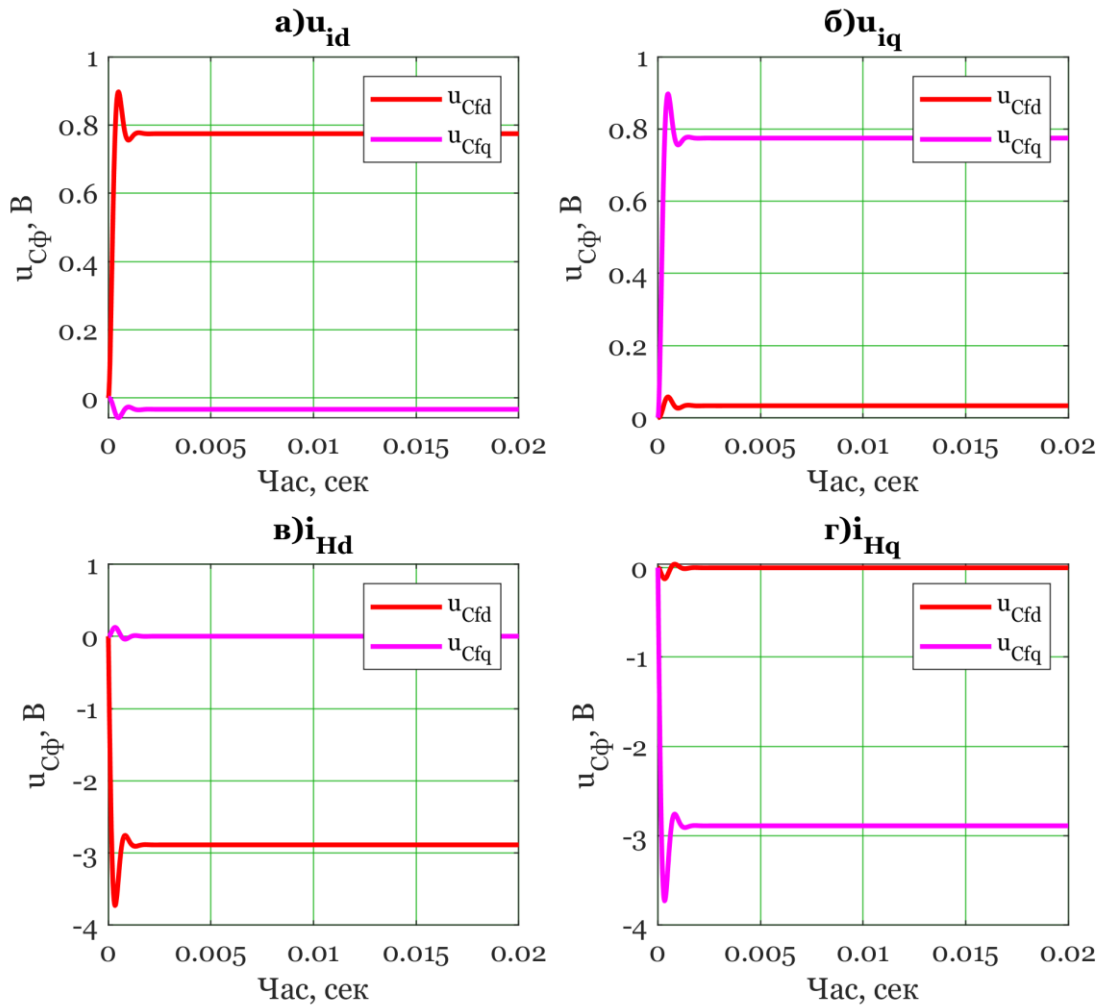


Рисунок 5.2 – Перехідний процес в замкненій системі з лінійно-квадратичним регулятором з матрицями (5.15) при одиничній східчастій функції: а) канал «напруга інвертора d – напруга на конденсаторі фільтру»; б) канал «напруга інвертора q – напруга на конденсаторі фільтру»; в) канал «струм навантаження d – напруга на конденсаторі фільтру»; г) канал «струм навантаження q – напруга на конденсаторі фільтру»

Проте, якщо співставляти з методом розміщення полюсів (див. п.4.3 даного наукового пошуку), то такі випадкові значення W_x і W_u ЛКР не є ефективними, оскільки ЯПП взагалі не покращилася. Про це може свідчити порівняння даних з табл. 5.1, 5.2 і табл. 4.3, 4.4.

Ще раз змінюємо випадковим чином значення вагових матриць змінних стану та керуючих дій:

$$W_x = \begin{bmatrix} 400 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 400 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 10 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 10 \end{bmatrix}; W_u = \begin{bmatrix} 15 & 0 \\ 0 & 15 \end{bmatrix}. \quad (5.19)$$

Рішення APP (5.12):

$$S = \begin{bmatrix} 0,0361407 & 0 & 0,0021825 & 0 \\ 0 & 0,0361407 & 0 & 0,0021825 \\ 0,0021825 & 0 & 0,004590596 & 0 \\ 0 & 0,0021825 & 0 & 0,004590596 \end{bmatrix}. \quad (5.20)$$

Розташування полюсів

$$p = \begin{bmatrix} (-5,818766 + 4,905226j) \cdot 10^3 \\ (-5,818766 - 4,905226j) \cdot 10^3 \\ (-5,818766 + 4,2769077j) \cdot 10^3 \\ (-5,818766 - 4,2769077j) \cdot 10^3 \end{bmatrix}. \quad (5.21)$$

Матриця підсилення зворотного зв'язку за станом:

$$K = \begin{bmatrix} 4,818766 & 0 & 0,2909944 & 0 \\ 0 & 4,818766 & 0 & 2,2909944 \end{bmatrix}. \quad (5.22)$$

Як бачимо третій і четвертий стовпчик матриці порівняно залишилися такими ж як і (5.18), так як не змінилася W_u .

У табл. 5.3, табл. 5.4 і на рис. 5.3 наведено числові характеристики показників ЯПП і сам вигляд ПП в замкненій системі. У варіанті (5.19) значень W_x і W_u , ЛКР має вдаліший результат керування ніж у варіанті (5.15). ЯПП підвищилася суттєвіше, якщо порівнювати як з розімкненою системою, так і з методом розміщення полюсів з попереднього розділу 4.

Так, співставляючи дані з табл. 5.3 щодо часу ПП з розімкненою системою можна побачити, що він скорочується для всіх розглянутих каналів більше чим на 80%. Найбільше для каналів $u_{id} - u_{C\phi q}$, $u_{iq} - u_{C\phi d}$ та $i_{Hq} - u_{C\phi d}$,

$i_{Hd} - u_{C\phi q}$, відповідно, 86,59% і 86,1%. І дещо менше для каналів $u_{id} - u_{C\phi d}$, $u_{iq} - u_{C\phi q}$ та $i_{Hd} - u_{C\phi d}$, $i_{Hq} - u_{C\phi q}$, відповідно, 83,98% і 82,71%.

Перерегулювання також знижується (див. табл. 5.4), при чому більше чим на 90% у всій системі. Так для каналів $u_{iq} - u_{C\phi d}$, $u_{id} - u_{C\phi q}$, $i_{Hd} - u_{C\phi d}$, $i_{Hq} - u_{C\phi q}$ це зниження найбільше і воно становило 98,91%. Пари каналів $u_{id} - u_{C\phi d}$, $u_{iq} - u_{C\phi q}$ і $i_{Hq} - u_{C\phi d}$, $i_{Hd} - u_{C\phi q}$ мали трохи гірше скорочення – на 97,01% і 93,87%, відповідно.

Таблиця 5.3 – Час перехідного процесу (секунд) замкненої системи динамічного відновлювача напруги з матрицями (5.19)

	$u_{C\phi d}$	$u_{C\phi q}$
u_{id}	0,00049	0,001
u_{iq}	0,001	0,00049
i_{Hd}	0,00066	0,00093
i_{Hq}	0,00093	0,00066

Співставляючи ж з методом розміщення полюсів (табл. 4.3 і 4.4) також у цілому можна бачити покращення ЯПП, окрім каналів $i_{Hd} - u_{C\phi q}$, $i_{Hq} - u_{C\phi d}$, де діють збурення.

У системі з ЛКР налаштованим за матрицями (5.19) час ПП знижується для $u_{id} - u_{C\phi d}$ на 22,57%, для $u_{iq} - u_{C\phi d}$ і $u_{id} - u_{C\phi q}$ – на 23,24%, для $i_{Hd} - u_{C\phi d}$ – на 17,83%, для $i_{Hq} - u_{C\phi q}$ – на 14,47%. Найбільше час ПП скоротився у каналі $u_{iq} - u_{C\phi q}$ на 40,57%. Збільшення ж часу ПП мало місце тільки каналів згаданих вище.

Таблиця 5.4 – Перерегулювання (%) замкненої системи динамічного відновлювача напруги з матрицями (5.19)

	$u_{C\phi d}$	$u_{C\phi q}$
u_{id}	1,795	7,789
u_{iq}	7,789	1,795
i_{Hd}	2,695	16,35
i_{Hq}	16,35	2,695

Згідно показника перерегулювання система з ЛКР також має кращу ЯПП. У каналі $u_{id} - u_{C\phi d}$ воно скоротилося на 86,74%, у $u_{iq} - u_{C\phi d}$ і $u_{id} - u_{C\phi q}$ – на 88,24%, у $i_{Hd} - u_{C\phi d}$ – на 88,71%, у $u_{iq} - u_{C\phi q}$ – на 88,66%. Більше чим на 90%, а саме на 90,64% зниження перерегулювання сягнуло за каналом $i_{Hq} - u_{C\phi q}$. Разом з тим, для $i_{Hd} - u_{C\phi q}$, $i_{Hq} - u_{C\phi d}$ перерегулювання в системі ЛКР-контролером буде більшим за систему в якій матриця K отримана методом розміщення полюсів. Проте ця різниця буде не такою вже й великою. Так для каналу $i_{Hd} - u_{C\phi q}$ перерегулювання більше на 15,3%, а саме 16,35% проти 14,18%, а для каналу $i_{Hq} - u_{C\phi d}$ лише на 5,2% – 16,35% проти 15,5%.

У цілому при керуванні ДВН з залученням ЛКР-контролера з налаштуванням (5.19) вагових матриць стану W_x і керування W_u маємо суттєве покращення показників ЯПП, котрі, якщо розглядати найбільш критичний з них – перерегулювання, перевищують стандартизовані значення і не потребують корекції через переналаштування ЛКР. Тільки канали $i_{Hq} - u_{C\phi d}$ і $i_{Hd} - u_{C\phi q}$ мають в цілому вищий за стандартнодопустимий показник в 16,35%. Але відносно тих значень, що мали місце раніше, це також дуже гарний результат, що свідчить про ефективність такого варіанту ЛКР.

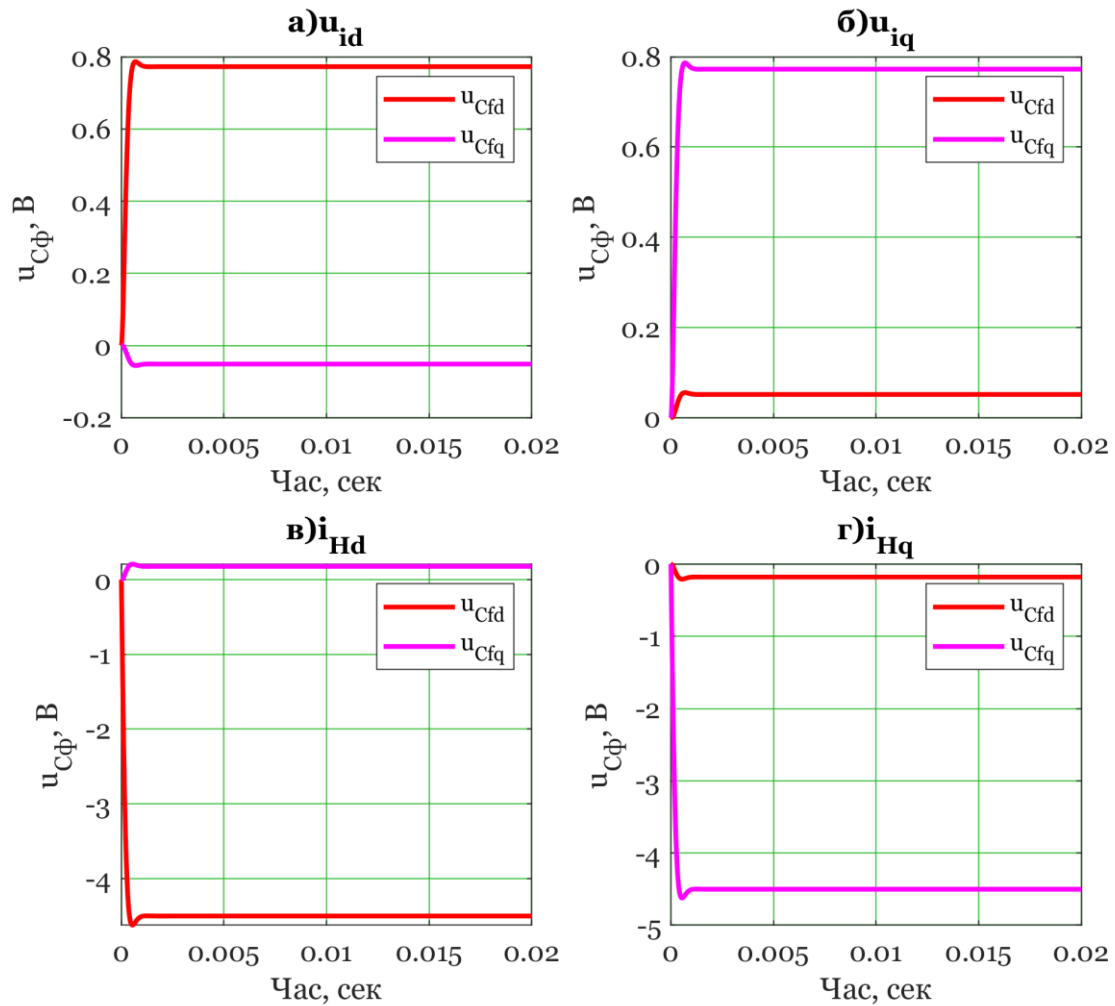


Рисунок 5.3 – Перехідний процес в замкненій системі з лінійно-квадратичним регулятором з матрицями (5.19) при одиничній східчастій функції: а) канал «напруга інвертора d – напруга на конденсаторі фільтру»; б) канал «напруга інвертора q – напруга на конденсаторі фільтру»; в) канал «струм навантаження d – напруга на конденсаторі фільтру»; г) канал «струм навантаження q – напруга на конденсаторі фільтру»

Отже шляхом регулювання значень W_x і W_u можна досягти потрібних характеристик ПП.

У подальшому обґрунтуємо ЦФ, яка може застосовуватись для автоматизованого визначення вагових матриць, що забезпечили б стандартизовані ПЯЕ при керуванні ДВН з залучення ЛКР-контролера та найраціональніший спосіб її мінімізації.

5.3 Вибір способу оптимального налаштування лінійно-квадратичного регулятора динамічного відновлювача напруги

Як вже зазначалося у попередньому тексті дисертаційної роботи підбір значень матриць W_x і W_u ЛКР-контролера дає змогу отримати ЯПП, що задовольнятиме стандартизованим значенням. Однак вибір відповідних значень для цих матриць часто є складним завданням, оскільки вимагає повного розуміння динаміки системи та цілей, що досягаються шляхом керування. Тому їх підбирання в ручному варіанті майже не можливе або є надто складним. Отже логічно цей процес треба автоматизувати.

В такому форматі найпростішим варіантом є перебір всіх значень W_x і W_u , проте це потребує великих витрат часу. Альтернативою для цього може бути аналітичний підхід, як-то правило Брайсона [103, 104]. Але це також надто «рамочна» оцінка W_x і W_u . Тому його залучають, як правило, з метою встановлення лише початкових значень матриць ЛКР.

Таким чином, традиційні методи налаштування вищенаведених параметрів не можуть гарантувати достатньої ЯПП. Особливо це відноситься до умов у таких складних системах, як-то ДВН в СЕП підземних рудників, де потрібне забезпечення балансу між декількома показниками ЯПП, як-то перерегулювання, час ПП, тощо і адаптування до непрогнозованих збурень.

Коли класичні підходи, з ряду системоутворюючих причин, не можуть бути застосовані доречним виглядає задіяння методів популяційної оптимізації, як-от ГА, що виділяється серед них простотою та ефективністю [105, 106]. ГА використовують еволюційні механізми, як-то селекція, схрещування і мутація, для визначення екстремуму дуже нелінійних поверхонь відгуку ЦФ через підбір хромосом, котрі дають мінімум таких ЦФ. Це дозволить знаходити найкращі за певним критерієм параметри ЛКР для ДВН в електромережі підземного рудника, де зв'язок між W_x і W_u та ЯПП невідомий, а у явному вигляді характеризується як нелінійний.

При оптимізації параметрів САК з багатомірною просторово-станною моделлю, як-то ДВН, вигляд поверхні відгуку ЦФ може бути доволі складним. Тут може бути багато локальних мінімумів, які ГА уникає через стохастичний спосіб роботи.

ГА пристосовується для оптимізації W_x і W_u шляхом визначення ЦФ, яка кількісно оцінює ЯПП в системі. Ця ЦФ може включати ключові показники, як-то перерегулювання, час ПП, тощо. Шляхом перетворення значень W_x і W_u в хромосоми в популяції. ГА створює різноманітні набори закодованих W_x і W_u , залишаючи і потім модифікуючи ті з них, які дають найкращий компроміс між різними показниками ЯПП, а ті які дають незадовільні результати – відкидаючи. При чому, ГА можуть вирішувати задачі оптимізації з багатьма критеріями, гарантуючи, що процес знаходження W_x і W_u враховує суперечності, які обов'язково потенційно з'являються, при досягненні стандартизованих значень окремих показників ЯПП.

Проте в реалізації ГА є обчислювально витратним. Складність розрахунків збільшується зі зростання величини популяції і числа поколінь. Однак можливості паралельних обчислень і високі частоти тактування цифрових контролерів дещо зменшили вплив цієї проблеми. Крім того, після отримання наборів значень W_x і W_u ЛКР ДВН близьких до оптимальних, САК працює як звичайно налаштований ЛКР-контролер, без додаткових обчислювальних витрат на виконання ГА при безпосередній стабілізації напруги живлення підземного електроприймача в реальному часі.

Таким чином, використання технології ГА є вдалим вибором для оптимізування W_x і W_u ЛКР-контролера ДВН. Це створює підґрунтя для отримання достатньо показових динамічних характеристик САК за менший час налаштування ЛКР порівняно як зі звичайними методами, як-то прямим перебором або методом Брайсона, так і іншими.

Далі, в розрізі логіки пошуку, розглянемо можливий вигляд ЦФ для генетичної оптимізації ЛКР ДВН. Тут можливе залучення двох підходів.

Перший – це пряме визначення показників ЯПП і зведення їх в один функціональний вираз, як-то у [107], другий – це використання критерію, який концентрується на відмінності виходу об’єкту від завдання САК, як-то [108]. Таким критерієм може бути ІАП.

Узагальнену ЦФ, що містить декілька показників ЯПП можна представити:

$$J = \alpha \cdot P + \beta \cdot C + \gamma \cdot E + \delta \cdot U, \quad (5.23)$$

де $P = \max \left(\frac{y_{\max i} - y_{yi}}{y_{yi}}, \frac{y_{\max i+2} - y_{yi+2}}{y_{yi+2}}, \dots, \frac{y_{\max i+N} - y_{yi+N}}{y_{yi+N}} \right)$ – найбільше

перерегулювання з усіх N -каналів просторово-станної моделі ДВН;

$C = \max (c_i, c_{i+1}, \dots, c_{i+N})$ – найбільший час ПП;

$E = \max (e_i, e_{i+1}, \dots, e_{i+N})$ – найбільша статична похибка;

U – ефективність керуючих дій ЛКР, яка обчислюється як сума квадратів діагональних елементів матриці K ;

$\alpha, \beta, \gamma, \delta$ – вага кожного показника ЯПП.

Використання (5.23) як критерію для ГА налаштування ЛКР в САК ДВН надає низку переваг. Завдяки явному розрахунку перерегулювання, часу ПП, статичної похибки або ефективності керуючих дій оптимізація забезпечує саме ту ЯПП, яку потрібно. Варіюванням значень ваг $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ можна покращувати той показник ЯПП, який є вирішальним для роботи оперативної стабілізації напруги в електромережі підземного рудника. Так як для САК ДВН, як вже було показано, важливішими є перерегулювання і час ПП, то вага цих показників у ЦФ (5.23) збільшиться величинами α і β . Тоді ГА при роботі надасть пріоритет значенням W_x та W_u , що створять плавний ПП.

Проте вираз (5.23) потребує проведення багатьох розрахунків, що дещо погіршує перспективи його залучення в роботу систем реального часу.

Інший варіант, що вимагає значно меншого числа обчислень, полягає в задіянні ІАП як ЦФ в ГА. Розрахунковий вираз для цього критерію:

$$J = \max \left(\int_0^T |e_i(t)| dt, \int_0^T |e_{i+1}(t)| dt, K, \int_0^T |e_{i+N}(t)| dt \right), \quad (5.24)$$

де $e_i = z_i - y_i$ – різниця між виходом ДВН та завданням ЛКР-контролера;

T – тривалість керування.

На відміну від інших подібних показників, таких як інтеграл квадратичної похибки або інтеграл абсолютної похибки, зваженої за часом, критерій ІАП зменшує загальну величини помилки – різниці між виходом ДВН і завданням САК (без розділення на похибки усталеного або перехідного режимів). З аналізу виразу ІАП видно, що позитивна і негативна помилки однаково впливають на значення (5.24), що робить пошук екстремуму ЦФ послідовним.

ІАП дозволяє узагальнити ЯПП при керуванні за зворотнім зв'язком одним спрощеним виразом, а не роздільним розрахунком показників як у (5.23). Це забезпечує обчислювальну простоту ІАП, робить практичним його задіяння для оптимізації ГА ЛКР в реальному часі, коли потрібно оцінювати великі обсяги популяцій.

Однак з іншої сторони формула (5.24) не враховує в явному вигляді перерегулювання, час ПП тощо, що робить критерій ІАП непрямим.

Підсумовуючи, можна сказати, що використання ГА гарантує, що оптимальні вагові матриці W_x та W_u будуть визначені, а ЛКР-контролер забезпечить досягнення бажаної ЯПП при оперативній стабілізації напруги живлення електроприймача рудника. При чому використання ІАП як ЦФ для налаштування ЛКР-контролера ДВН на основі ГА є більш раціональним ніж функціональний вираз поєднуючий різні показники ЯПП. Він не вимагає значних розрахунків і дозволяє пришвидшити налаштування САК.

На рис. 5.4 показана спрощена структура САК ДВН з ЛКР налаштованим ГА.

Зеленим кольором показані блоки, котрі використовуються для еволюційної оптимізації ЛКР: блок «Цільова функція», що обчислює значення

ЦФ і блок «ГА», який імплементує алгоритм пошуку мінімуму ЦФ. На схемі не показуються канали передачі даних для визначення керуючих дій регулятора (5.14), що показані на рис. 5.1. ГА під час оптимізації відбирає хромосоми з нижчими показниками ІАП. Так створюється висока ймовірність того, що наступні покоління дадуть W_x та W_u ЛКР кращих за точністю.

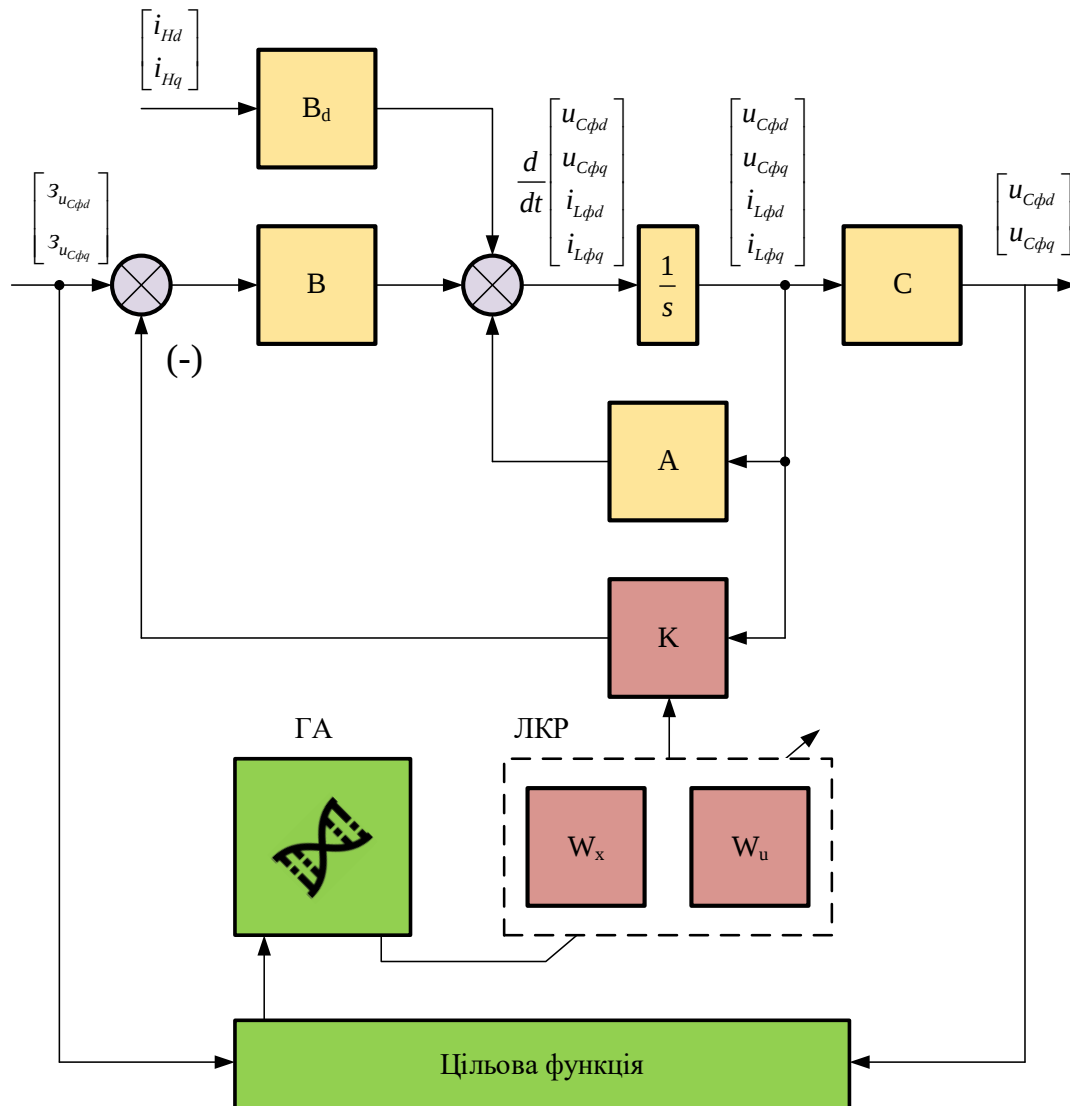


Рисунок 5.4 – Функціональна схема керування динамічним відновлювачем напруги з лінійно-квадратичним регулятором налаштованим генетичним алгоритмом

Після того, як оптимальні W_x та W_u знайдені, ЛКР-контролер ДВН зберігає свою звичайну обчислювальну ефективність, оскільки оптимальна матриця K фіксується і застосовується в керуванні.

5.4 Оптимізація замкненої системи керування динамічним відновлювачем напруги з використанням генетичного алгоритму

На рис. 5.5 показана блок-схема алгоритму керування ДВН з ЛКР налаштованим ГА.

На першому кроці задаються параметри схеми заміщення ДВН: активний опір R_ϕ , індуктивність L_ϕ , ємність C_ϕ , частоту мережі f та кутову частоту $\omega_0 = 2\pi f$. Вони визначають електричні властивості системи оперативної стабілізації напруги рудничного електроприймача. За ними будується математична модель ДВН.

Далі ініціалізується просторово-станна модель ДВН, яка представляється матрицями A, B, B_d, C, D .

На наступному кроці задаються параметри генетичного алгоритму, що оптимізує вагові матриці ЛКР: розмір популяції (N_{II}) – задає кількість можливих рішень у кожній генерації, швидкість мутації (III_M) – впливає на інтенсивність змін у вибраних хромосомах, і число генерацій (N_G), що визначає, скільки циклів алгоритм виконуватиме до свого завершенням.

Також встановлюється граничне значення похибки ІАП ($IAП_{\max}$).

Після чого генерується початкова популяція вагових матриць W_x і W_u для ЛКР-контролера ДВН у встановлених межах. W_x і W_u заповнюються випадковими значеннями. Це дозволяє отримати різні стартові точки в межах ЦФ, що прискорює оптимізацію ЛКР.

Далі кожен набір W_x і W_u в популяції кодується у вигляді хромосом, котрі містять значення всіх діагональних елементів вагових матриць ЛКР. Це необхідно для роботи ГА, оскільки відбір, схрещування та мутація застосовуються тільки хромосом.

Тут починається головний цикл алгоритму.

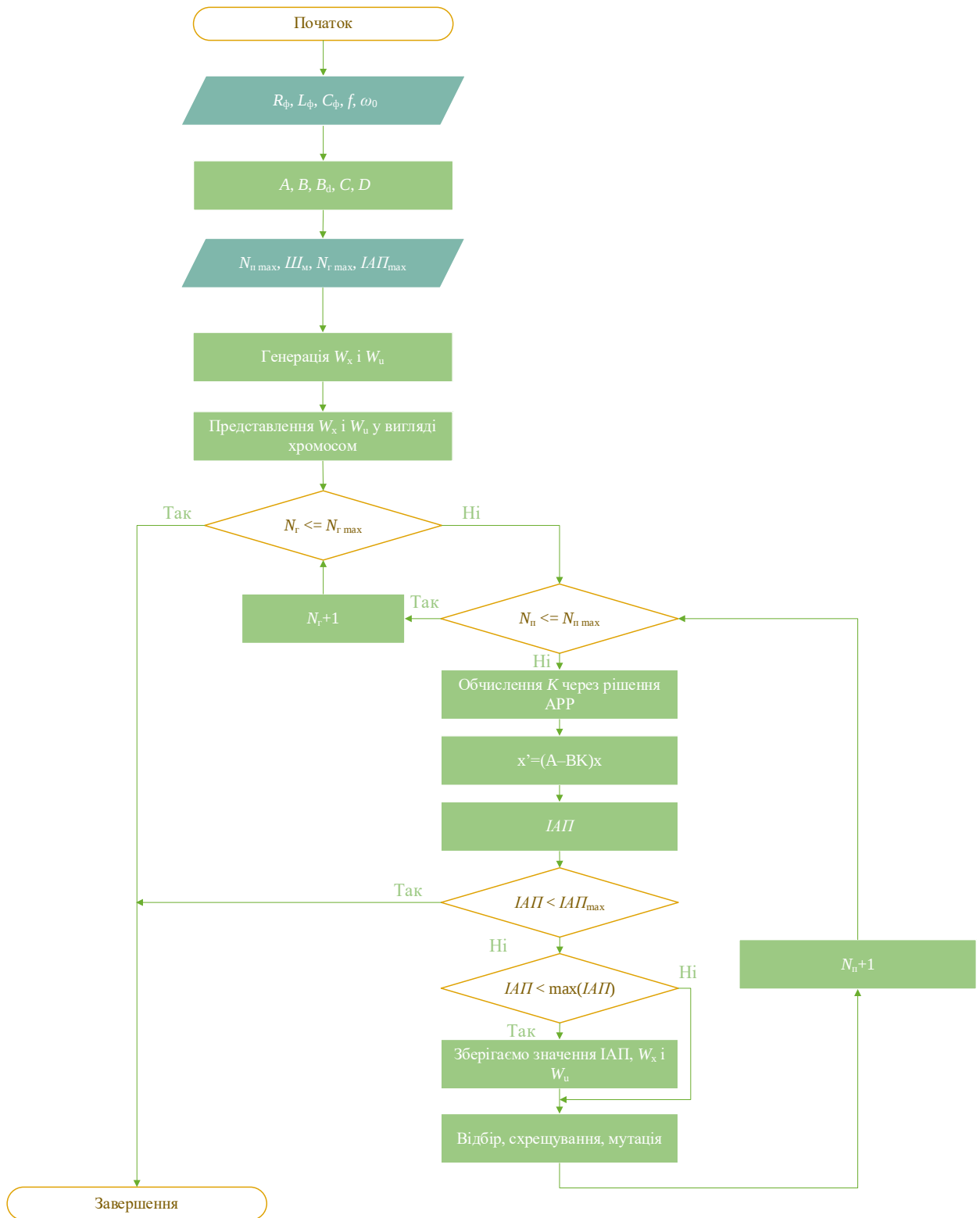


Рисунок 5.5 – Алгоритм керування динамічним відновлювачем напруги з лінійно-квадратичним регулятором налаштованим генетичним алгоритмом

Спочатку для кожного набору W_x і W_u обчислюється матриця K шляхом розв'язку АРР.

Після чого моделюється замкнена система ДВН, у якій керуючі дії визначаються за допомогою знайденої матриці K , що дозволяє провести оцінювання поведінки ДВН при застосуванні ЛКР зі знайденими W_x і W_u .

Після моделювання обчислюється ІАП, яка кількісно оцінює якість знайденого рішення.

Отримане значення ІАП порівнюється із граничною ІАП. Якщо рішення задовольняє умові, то ГА завершує роботу, і поточне значення W_x і W_u вважається оптимальним. У іншому випадку оптимізація триває.

Якщо ІАП менше ніж та, що отримувалася на попередніх циклах роботи алгоритму, зберігаються поточне ІАП та відповідні їй вагові матриці ЛКР – W_x і W_u . Відбувається еволюція популяції. ГА відбирає кращі рішення для ЛКР. Більшу ймовірність схрещування мають хромосоми з меншою ІАП.

Далі проводиться схрещування: дві батьківські хромосоми, що кодують набори матриць ЛКР, обмінюються частинами. Так створюються нові рішення. При чому можуть використовуватися різні способи схрещування для якісного комбінування батьківських хромосом.

Останнім кроком у роботі циклу ГА є мутація. Здійснюється випадкова зміна елементів хромосом. Це зберігає різноманіття популяції вагових матриць ЛКР, щоб не відбулося передчасне завершення ГА в локальному мінімумі ЦФ.

Цикл ГА повторюється допоки не буде досягнуто граничне число генерацій або не буде знайдено оптимальні значення W_x і W_u для ЛКР ДВН, що забезпечує мінімальну ІАП.

Проведемо оптимізацію ЛКР-контролера ДВН з використанням алгоритму (див. рис. 5.5). Для налаштування ГА встановимо, що число хромосом складатиме $N_{II} = 40$, імовірність схрещування та мутації 80%, число хромосом, що переходять в наступну генерацію без схрещування і

мутації – 20%. Так як w_x і w_u складаються з дійсних чисел, тому для схрещування доцільно задіяти арифметичний спосіб виду:

$$H = \alpha \Pi_1 + (1 - \alpha) \Pi_2, \quad (5.25)$$

де H – хромосома-нащадок;

Π_1, Π_2 – хромосоми-пращури;

α – коефіцієнт ступня поєднання хромосом-пращурів.

Спираючись на [109–111] інтенсивність мутації має вирішальний вплив на швидкість мінімізації ЦФ при залученні ГА. Тому розглянемо декілька варіацій значень інтенсивності мутації матриці w_x (III_{MWx}) і інтенсивність мутації матриці w_u (III_{MWu}). Спершу встановимо їх в такі значення $III_{MWx} = 4$ і $III_{MWu} = 1$.

Умовою завершення роботи ГА визначимо проходження певного числа еволюційних генерацій. Для симуляції приймемо $N_r = 200$.

Після роботи ГА з оптимізацією за (5.24) були визначені w_x та w_u :

$$W_x = \begin{bmatrix} 226,73 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 44,046 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 332,49 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 246,66 \end{bmatrix}; W_u = \begin{bmatrix} 0,1 & 0 \\ 0 & 0,1 \end{bmatrix}. \quad (5.26)$$

Матриця зворотного зв'язку за станом, встановлена через рішення APP відповідно до w_x і w_u ЛКР (5.26):

$$K_{onm} = \begin{bmatrix} 57,940169 & 0,078459 & 56,666599 & 0,1703859 \\ 0,078459 & 37,4340877 & 0,2449854 & 48,677985 \end{bmatrix}. \quad (5.27)$$

На рис. 5.6 показано процес еволюційного пошуку оптимальних w_x і w_u ЛКР ДВН.

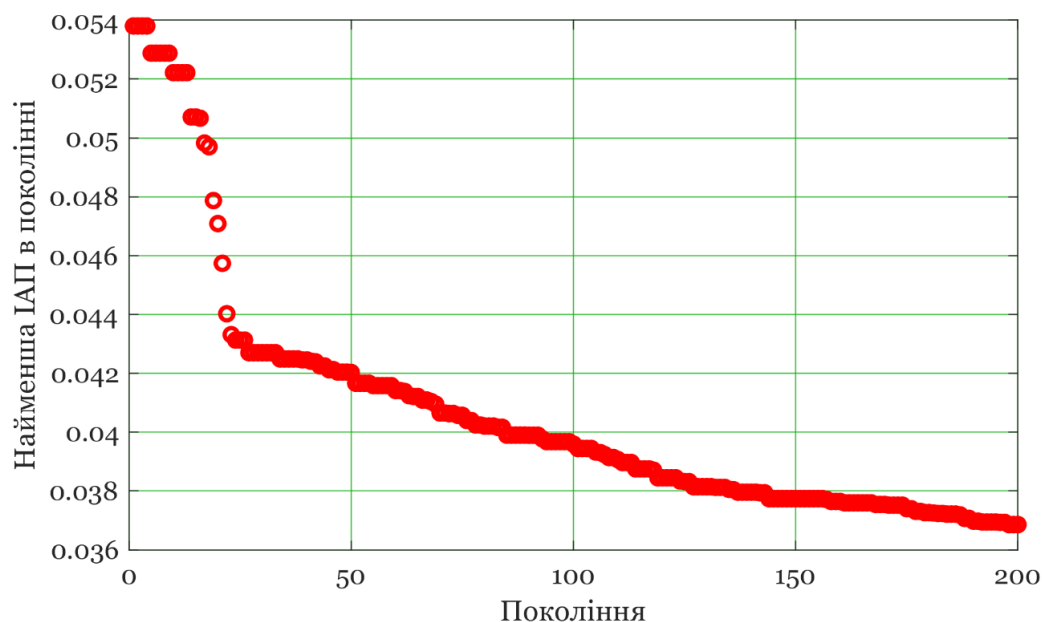


Рисунок 5.6 – Зміна максимальної інтегральної абсолютної похибки під час еволюційної оптимізації лінійно-квадратичного регулятора

Як видно, спочатку мінімізація відбувається доволі інтенсивно, але після приблизно 25 генерації починає проходити більш плавно. Як свідчить графік, за 200 генерацій оптимальні значення w_x і w_u не були визначені. Пошук тривав би і надалі.

У табл. 5.5, табл. 5.6 і на рис. 5.7 наведено числові характеристики показників ЯПП і вигляд ПП в замкненій системі з ЛКР зі значеннями w_x і w_u , отриманими на 200-ій генерації ГА.

Розглядаючи час ПП як показник ЯПП, то для ЛКР оптимізованого ГА відбувається суттєве пришвидшення переходу між усталеними станами, якщо співставляти з розімкненою системою.

Найбільше час ПП скоротився для каналу $u_{iq} - u_{Cfd}$ на 97%, найменше – на 93,19% для каналу $u_{iq} - u_{Cfq}$. Якщо ж співставляти з показниками замкненої системи з ЛКР ДВН, w_x і w_u якого задавалися випадковим чином (див. табл. 5.3), то скорочення часу ПП також відбувається. І знову ж таки найбільше і найменше пришвидчення ПП мало місце для каналів, що

пов'язують напругу інвертора ДВН з напругою на конденсаторі LC-фільтру, а саме $u_{iq} - u_{Cfd}$ і $u_{iq} - u_{Cfq}$ – для яких зниження часу ПП становило, відповідно, 83,89% і 57,33%. Для інших каналів час ПП знижується на 76...77%.

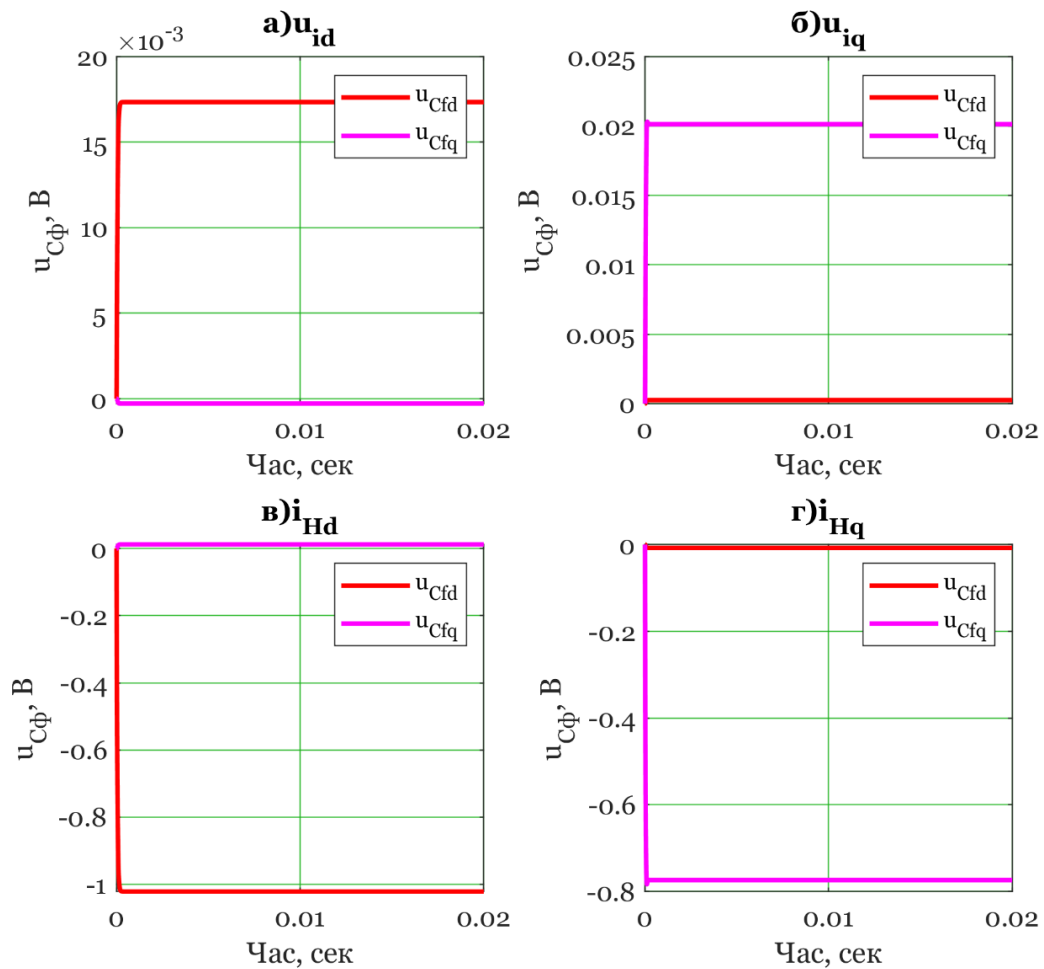


Рисунок 5.7 – Перехідний процес в замкненій системі з лінійно-квадратичним регулятором оптимізованим генетичним алгоритмом при східчастій функції: а) канал «напруга інвертора d – напруга на конденсаторі фільтру»; б) канал «напруга інвертора q – напруга на конденсаторі фільтру»; в) канал «струм навантаження d – напруга на конденсаторі фільтру»; г) канал «струм навантаження q – напруга на конденсаторі фільтру»

Таблиця 5.5 – Час перехідного процесу (секунд) замкненої системи динамічного відновлювача напруги з оптимізованим лінійно-квадратичним регулятором

	$u_{C\phi d}$	$u_{C\phi q}$
u_{id}	$0,1598 \cdot 10^{-3}$	$0,2231 \cdot 10^{-3}$
u_{iq}	$0,1611 \cdot 10^{-3}$	$0,2091 \cdot 10^{-3}$
i_{Hd}	$0,1502 \cdot 10^{-3}$	$0,2174 \cdot 10^{-3}$
i_{Hq}	$0,2148 \cdot 10^{-3}$	$0,1878 \cdot 10^{-3}$

Як бачимо з табл. 5.6 для каналів $u_{id} - u_{C\phi d}$ і $i_{Hd} - u_{C\phi d}$ перегулювання відсутнє взагалі, а там де воно присутнє – його значення не перевищує стандартизованої величини, тобто 5%. Співставляючи з розімкненою системою, перерегулювання знизилось для переважного числа каналів на 98% і вище. Тільки для $u_{iq} - u_{C\phi q}$ воно знизилось на 94,55%. Якщо ж співставляти з показниками замкненої системи з ЛКР ДВН, випадковим чином налаштованими ваговими матрицями (див. табл. 5.4), то для каналів окрім $u_{iq} - u_{C\phi q}$ і $i_{Hq} - u_{C\phi d}$, також відбулося зниження перерегулювання в системі з ЛКР оптимізованим ГА. Так для $u_{id} - u_{C\phi q}$ це зниження становило 52,53%, для $u_{iq} - u_{C\phi d} - 83,67\%$, для $i_{Hd} - u_{C\phi q} - 74,39\%$ і для $i_{Hq} - u_{C\phi d} - 77,42\%$. Тут звісно не згадуються канали без перерегулювання $u_{id} - u_{C\phi d}$ і $i_{Hd} - u_{C\phi d}$.

Для вищезгаданих $u_{iq} - u_{C\phi q}$ і $i_{Hq} - u_{C\phi d}$ зниження не сталося. Перерегулювання для $u_{iq} - u_{C\phi q}$ становило в неоптимізованій ГА системі керування 3,2766% проти 1,795% у оптимізованій, а для $i_{Hq} - u_{C\phi d} - 4,995\%$ проти 2,695%, відповідно.

Таблиця 5.6 – Перерегулювання (%) замкненої системи динамічного відновлювача напруги з оптимізованим лінійно-квадратичним регулятором

	$u_{C\phi d}$	$u_{C\phi q}$
u_{id}	0	3,6973
u_{iq}	1,2723	3,2766
i_{Hd}	0	4,1863
i_{Hq}	3,6917	4,995

Отже, в цілому оптимізація значень матриць ГА дає позитивний ефект на роботу замкненої САК з ЛКР. Проведемо симуляції з дещо іншими параметрами ГА і співставимо отримані результати.

Зменшимо у два рази інтенсивності мутацій матриць ваги ЛКР, а саме до значень $III_{MWx} = 2$ і $III_{MWu} = 0,5$.

Вагові матриці змінних стану та керуючих дій:

$$W_x = \begin{bmatrix} 127,75 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 258,62 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 392,27 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 459,42 \end{bmatrix}; \quad (5.28)$$

$$W_u = \begin{bmatrix} 0,1122 & 0 \\ 0 & 0,1 \end{bmatrix}.$$

Оптимізована матриця зворотного зв'язку:

$$K_{onm} = \begin{bmatrix} 49.867781 & -0.0405192 & 62.3100349 & -0.137442 \\ -0.0405192 & 37,4340877 & -0.113723 & 66.78582 \end{bmatrix}. \quad (5.29)$$

З рис. 5.8 бачимо, що і цьому випадку за 200 генерацій оптимальні значення w_x і w_u не були визначені і еволюційний пошук налаштувань ЛКР ДВН тривав би й надалі.

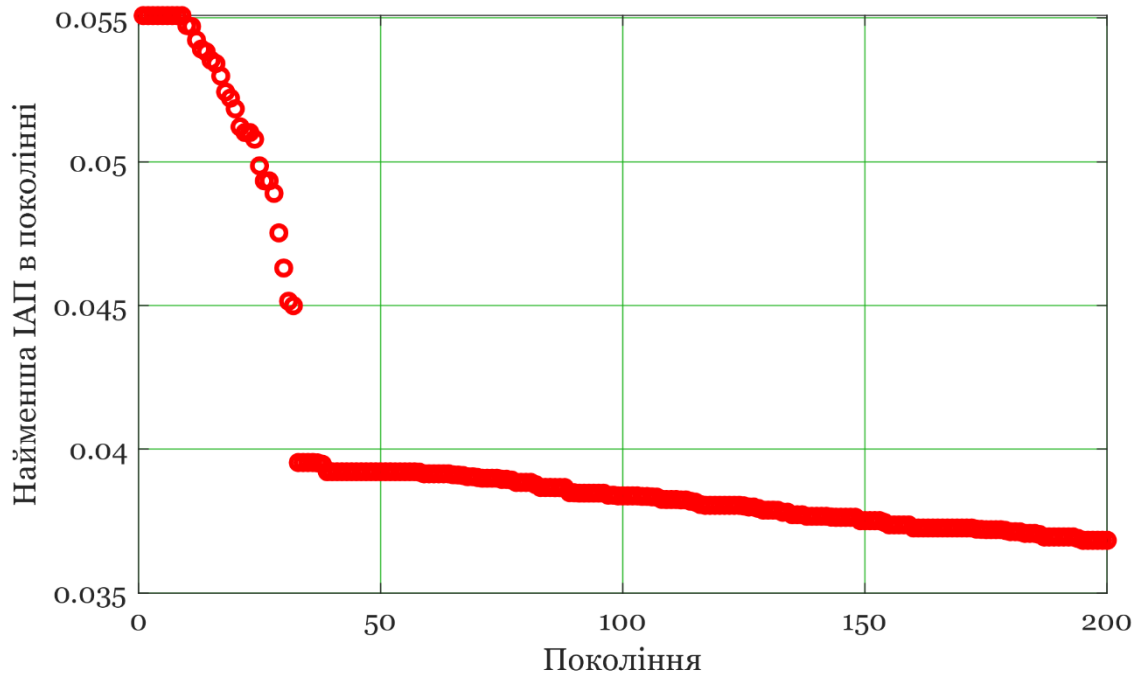


Рисунок 5.8 – Зміна максимальної інтегральної абсолютної похибки під час еволюційної оптимізації лінійно-квадратичного регулятора

Таблиця 5.7 – Час перехідного процесу (секунд) замкненої системи динамічного відновлювача напруги з оптимізованим лінійно-квадратичним регулятором

	u_{Cfd}	u_{Cfq}
u_{id}	$0,1148 \cdot 10^{-3}$	$0.1595 \cdot 10^{-3}$
u_{iq}	$0.1494 \cdot 10^{-3}$	$0.1458 \cdot 10^{-3}$
i_{Hd}	$0.092 \cdot 10^{-3}$	$0.1369 \cdot 10^{-3}$
i_{Hq}	$0.1375 \cdot 10^{-3}$	$0.1291 \cdot 10^{-3}$

Аналізуючі дані з табл. 5.7 щодо часу ПП, можна стверджувати, що пришвидшення відбувається якщо співставляти з результатами розімкненої системи (табл. 4.1), замкненої системи з неоптимізованим (табл. 5.3) та оптимізованим ЛКР-контролером (табл. 5.5). Порівняємо тільки з останнім варіантом, так як він мав найнижчий час ПП за усіма каналами з трьох згаданих систем. Найбільше час ПП скоротився на 38,74% і 37,03% для каналів

$i_{Hd} - u_{C\phi d}$ та $i_{Hd} - u_{C\phi d}$, відповідно. Найменше на 7,26% для каналу $u_{iq} - u_{C\phi d}$. Для каналів $u_{id} - u_{C\phi d}$, $u_{id} - u_{C\phi q}$, $u_{iq} - u_{C\phi q}$, $i_{Hq} - u_{C\phi d}$ і $i_{Hq} - u_{C\phi q}$ скорочення часу ПП склало 28,16%, 28,5%, 30,27%, 35,96% і 31,26%, відповідно. Тобто тривалість переходу між усталеними значеннями дуже швидко (рис. 5.9).

Таблиця 5.8 – Перерегулювання (%) замкненої системи динамічного відновлювача напруги з оптимізованим лінійно-квадратичним регулятором

	$u_{C\phi d}$	$u_{C\phi q}$
u_{id}	0,3689	0,0853
u_{iq}	0,2184	0
i_{Hd}	0,5259	0,2482
i_{Hq}	0,2748	0

Аналізуючи дані щодо перерегулювання (табл. 5.8), бачимо, що для каналів $u_{iq} - u_{C\phi q}$ і $i_{Hq} - u_{C\phi q}$ його немає взагалі. У всіх інших каналах згідно просторово-станної моделі ДВН цей показник не перевищує 1%, що є найліпшим варіантом САК з усіх, що ми отримали у розділах 4 і 5 даного наукового пошуку. Співставляючи результати з неоптимізованою системою (табл. 5.4), у оптимізованій ГА системі в каналах $u_{id} - u_{C\phi d}$ і $i_{Hd} - u_{C\phi d}$ з'явилося незначне перерегулювання, а для каналів $u_{id} - u_{C\phi q}$, $u_{iq} - u_{C\phi d}$, $i_{Hd} - u_{C\phi q}$ і $i_{Hq} - u_{C\phi d}$ воно скоротилося на 97,69%, 82,83%, 94,07%, 92,56%, відповідно.

Виконаємо ще одну симуляцію еволюційного пошуку оптимальних значень w_x і w_u ЛКР ДВН з налаштуваннями ГА $III_{MWx} = 2$ і $III_{MWu} = 0,5$.

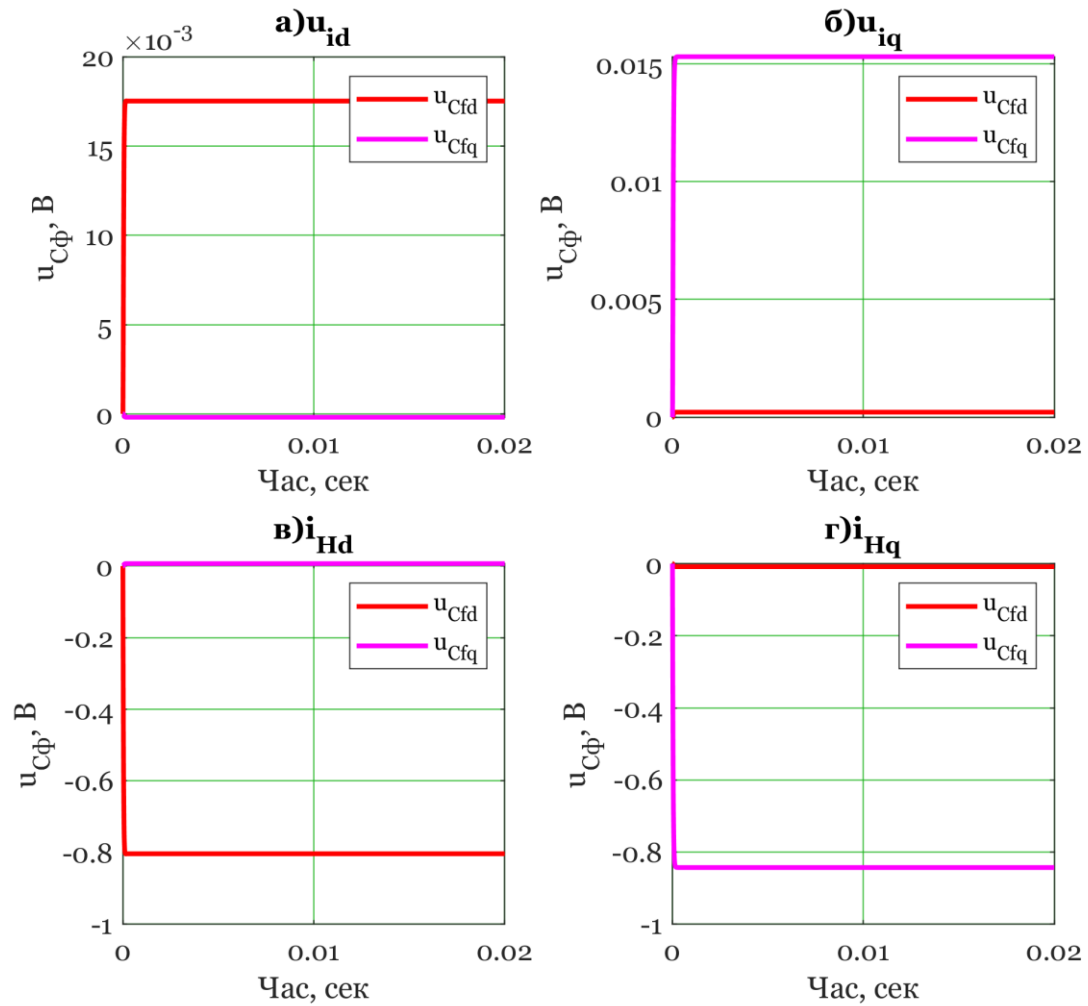


Рисунок 5.9 – Перехідний процес в замкненій системі з лінійно-квадратичним регулятором оптимізованим генетичним алгоритмом при одиничній східчастій функції: а) канал «напруга інвертора d – напруга на конденсаторі фільтру»; б) канал «напруга інвертора q – напруга на конденсаторі фільтру»; в) канал «струм навантаження d – напруга на конденсаторі фільтру»; г) канал «струм навантаження q – напруга на конденсаторі фільтру»

Вагові матриці змінних стану та керуючих дій:

$$W_x = \begin{bmatrix} 192,97 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 212,1096 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 377,28 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 405,03 \end{bmatrix}; W_u = \begin{bmatrix} 0,1 & 0 \\ 0 & 0,1 \end{bmatrix}. \quad (5.30)$$

Оптимізована матриця зворотного зв'язку:

$$K_{opt} = \begin{bmatrix} 55,7140532 & -0,0084056 & 60,431719 & -0,0307588 \\ -0,0084056 & 57,779746 & -0,029995 & 62,649367 \end{bmatrix}. \quad (5.31)$$

Дивлячись на графік (рис. 5.10) бачимо, еволюційний пошук значень w_x і w_u відбувається доволі інтенсивно, але після приблизно 60 генерації починає проходити більш плавно. Зі 140 генерації генерацій значення ІАП вже практично не змінюється, тобто в цій симуляції оптимальні налаштування ЛКР ДВН знайдені до досягнення максимального числа генерацій.

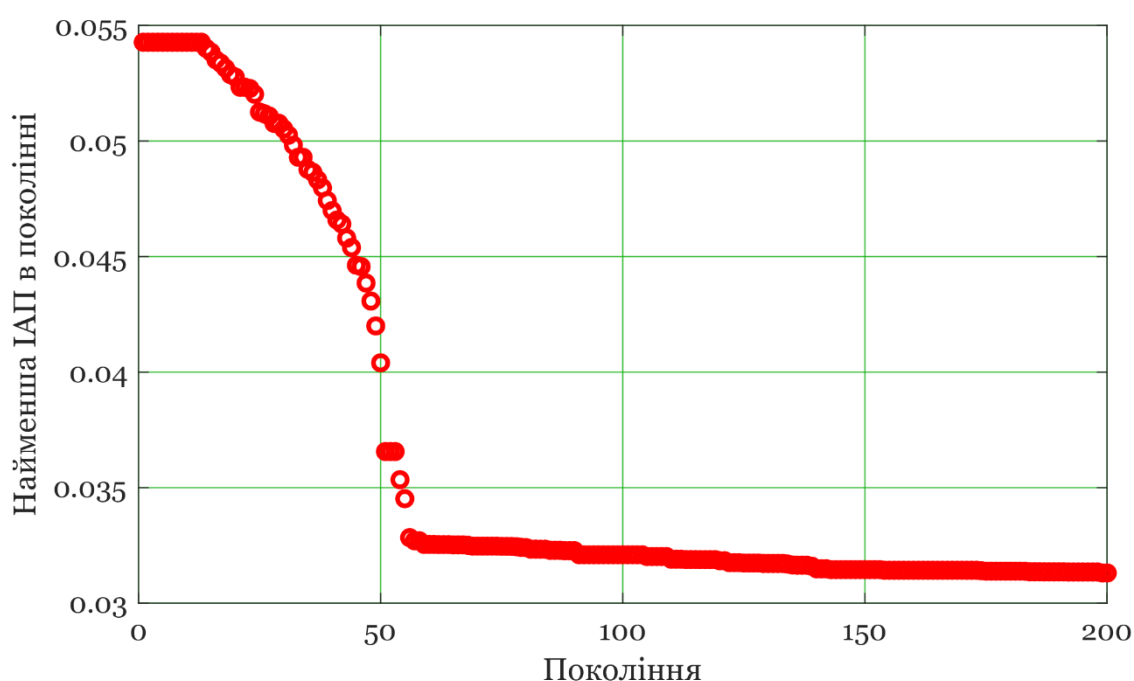


Рисунок 5.10 – Зміна максимальної інтегральної абсолютної похибки під час еволюційної оптимізації лінійно-квадратичного регулятора

У табл. 5.9, табл. 5.10 і на рис. 5.11 наведено числові характеристики показників ЯПП і вигляд ПП в замкненій системі.

Дані з табл. 5.9 показують, що в даній симуляції час ПП зріс порівняно з попереднім (див. табл. 5.7), але залишається доволі низьким якщо співставляти з розімкненою та неоптимізованою ГА замкненою системами. Такий ЛКР-контролер можна застосовувати в керуванні ДВН.

Таблиця 5.9 – Час перехідного процесу (секунд) замкненої системи динамічного відновлювача напруги з оптимізованим лінійно-квадратичним регулятором

	$u_{C\phi d}$	$u_{C\phi q}$
u_{id}	$0.1386 \cdot 10^{-3}$	$0.1735 \cdot 10^{-3}$
u_{iq}	$0.1824 \cdot 10^{-3}$	$0.1395 \cdot 10^{-3}$
i_{Hd}	$0.1283 \cdot 10^{-3}$	$0.169 \cdot 10^{-3}$
i_{Hq}	$0.1711 \cdot 10^{-3}$	$0.1205 \cdot 10^{-3}$

Таблиця 5.10 – Перерегулювання (%) замкненої системи динамічного відновлювача напруги з оптимізованим лінійно-квадратичним регулятором

	$u_{C\phi d}$	$u_{C\phi q}$
u_{id}	0	0
u_{iq}	0	0,0058
i_{Hd}	0	0
i_{Hq}	0	0,0008

Перерегулювання в цій симуляції взагалі немає для каналів $u_{id} - u_{C\phi d}$, $u_{id} - u_{C\phi q}$, $u_{iq} - u_{C\phi d}$, $i_{Hd} - u_{C\phi d}$, $i_{Hd} - u_{C\phi q}$ і $i_{Hq} - u_{C\phi d}$. Для каналу $u_{iq} - u_{C\phi q}$ воно прагне до нульового і складає лише 0,0058%. Для каналу $i_{Hq} - u_{C\phi q}$ перекулювання ще менше 0,0008%, тобто воно в цілому не виходить за ті межі, що і більшість значень на попередній симуляції (див. табл. 5.8).

Система керування з ЛКР-регулятором, що має вагові матриці виду (5.30) і матрицю зворотного зв'язку за станом (5.31) виявляється найліпшим варіантом з усіх систем розглянутих нами раніше.

Проте, як зазначалося раніше виникає похибка у статиці, тому в фінальний варіант САК повинна бути введена коригуюча ланка, що буде доводити значення виходів системи по вісям d і q до потрібного рівня.

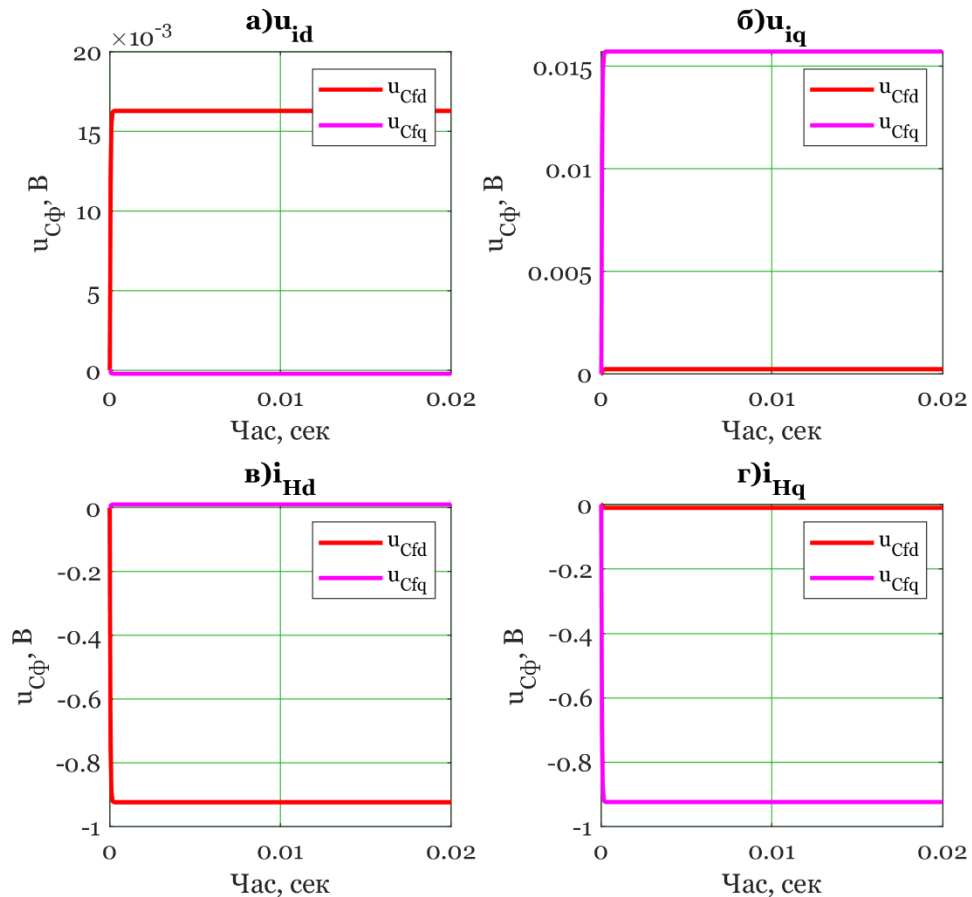


Рисунок 5.11 – Перехідний процес в замкненій системі з лінійно-квадратичним регулятором оптимізованим генетичним алгоритмом при одиничній східчастій функції: а) канал «напруга інвертора d – напруга на конденсаторі фільтру»; б) канал «напруга інвертора q – напруга на конденсаторі фільтру»; в) канал «струм навантаження d – напруга на конденсаторі фільтру»; г) канал «струм навантаження q – напруга на конденсаторі фільтру»

Невідповідність в результатах для двох симуляцій з однаковими налаштуваннями ГА можна пояснити випадковим характером генерації першої популяції. Проте також видно, що в двох випадках ГА приходить до області де ЦФ має мінімальні значення.

5.5 Імітаційна перевірка роботи трифазного динамічного відновлювача напруги з лінійно-квадратичним регулятором налаштованим генетичним алгоритмом

Для проведення симуляції роботи САК динамічним відновлювачем напруги в електромережі підземного рудника розроблено відповідну імітаційну модель, структура якої представлена на рис. 5.12. Вона складається з програмованого трифазного джерела живлення, котре імітує вихід пересувної підземної трансформаторної підстанції, трьох однофазних лінійних трансформаторів узгодження через які компенсуюча напруга від ДВН додається до напруги живлення, LC-фільтрів у кожній фазі, трифазного інвертора напруги на IGBT-транзисторах, джерела живлення постійного струму, САК і трифазного споживача, котрий імітує роботу чутливого до коливань напруги електроприймача залізничного підземного рудника. За прототип під час розробки моделі було взято системи [112–114].

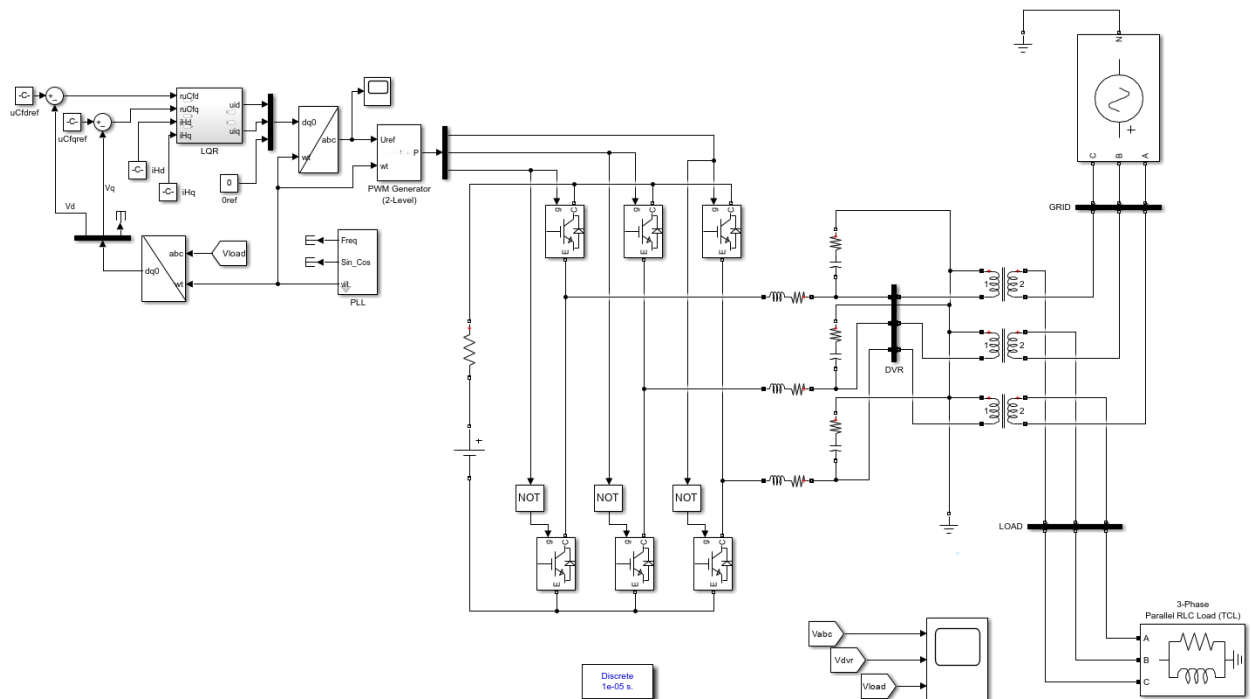


Рисунок 5.12 – Модель трифазного динамічного відновлювача напруги з лінійно-квадратичним регулятором в MATLAB/Simulink

Система керування ДВН складається з ФАПЧ (PLL), координатних перетворювачів прямого та інверсного перетворення Парка-Горєва, ШІМ-

генератора та основного ЛКР-контролера (LQR). У важливих для керування вузлах схеми встановлені блоки вимірювання, як-то GRID, LOAD, DVR. Параметри для вищезгаданих блоків були визначені у п. 4.2.2 даного наукового пошуку.

Коливання напруги в мережі імітувалися блоком програмованого трифазного джерела живлення. На початку симуляції напруги відповідали стандартизованим значенням $U_{ном}$, потім на 0,06 сек знижувалася до 0,8 від $U_{ном}$, а на 0,14 сек збільшувалася до 1,2 від $U_{ном}$. Вигляд того, як змінюється напруга в трифазній електромережі підземного рудника можна подивитись на рис. 5.11 а.

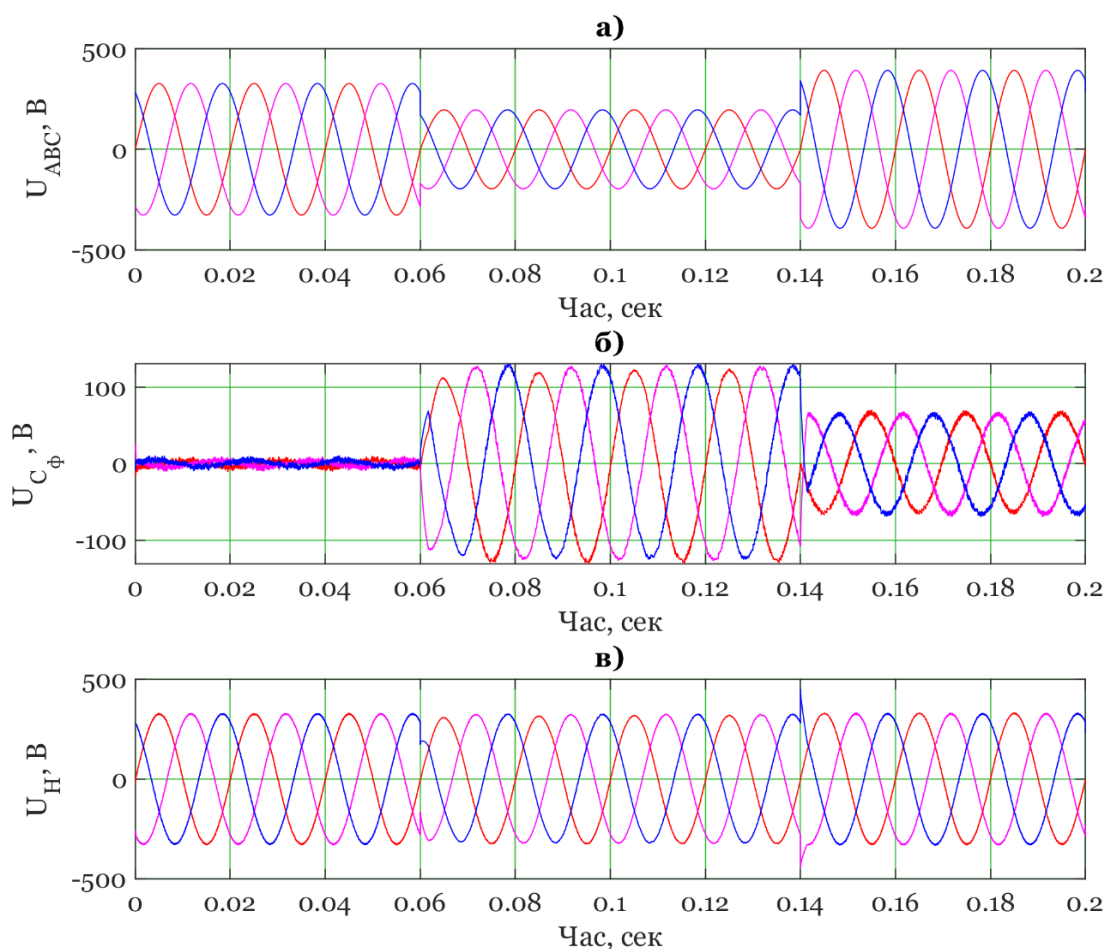


Рисунок 5.13 – Робота моделі динамічного відновлювача напруги в MATLAB/Simulink

На рис. 5.11 б і 5.11 в показані напруга на конденсаторах LC-фільтру та напруга на рудничному електроприймачі, відповідно. Як видно з графіків 5.11 б між 0,06 секунди і 0,14 секунди, коли імітується провал напруги в електромережі підземного рудника, напруга на конденсаторах збільшується системою керування ДВН на базі ЛКР до амплітуди близько 110 В. При чому напруга на конденсаторах знаходиться в одній фазі з напругою рудничної електромережі. Коли ж маємо зростання напруги між 0,14 секунди і 0,2 секунди, то амплітуда напруги знижується зі 110 В до близько 50 В. При чому тут бачимо зміщення по фазі між напругою електромережі та напругою на конденсаторах фільтру ДВН, що в поєднанні дає зниження напруги на рудничному електроприймачі до потрібних $U_{ном}$.

Відзначаємо, що в моменти зміни напруги в електромережі в напрузі електроприймача відбувається дуже нетривала зміна форми, яка потім усувається системою керування ДВН. Це виникає через те, що при симуляції провал і стрибок напруги відбуваються без затримок. У реальній же системі вони додатково нівелюються інерційністю елементів ДВН та всієї рудничної електромережі.

Отже, розроблена система з ДВН може застосовуватися при підвищенні якості напруги в електромережах підземних рудників.

5.6 Висновки до розділу 5

1. Керування напругою живлення електроприймача підземного рудника, зміна якої є нелінійною і стохастичною, здійснюється шляхом лінеаризації навколо певної робочої точки, після чого до отриманої лінійної моделі застосовується метод лінійно-квадратичного регулювання. У процесі керування напругою за допомогою динамічного відновлювача напруги враховується стохастична природа збурень, які діють в системі електропостачання рудника шляхом включення їх у модель як випадкових процесів з відомими статистичними характеристиками, визначеними на попередніх етапах наукового пошуку. При великому відхиленні від робочої

точки параметри регулятора переналаштовуються генетичним алгоритмом на основі оцінки характеристик відхилення напруги живлення в статиці й динаміці. Під час моделювання роботи динамічного відновлювача напруги встановлено, що запропонований лінійно-квадратичний регулятор може бути ефективно застосований під час керування якістю напруги, зміна якої є нелінійною і стохастичною.

2. Керування динамічним відновлювачем напруги, що стабілізує величину напруги на клемах електроприймача підземного рудника на стандартизованих рівнях, досягається використанням лінійно-квадратичного регулятора, котрий реалізує спосіб керування зі зворотнім зв'язком за станом просторово-станної моделі динамічного відновлювача напруги. Перевірка роботи лінійно-квадратичного регулятора з випадковими ваговими матрицям при стабілізації напруги на типовому підземному споживачі рудника показав, що його задіяння може підвищити якість перехідних процесів, якщо співставляти з системою без засобів керування, але сам контролер потребує налаштувань.

3. Обґрунтоване застосування генетичного алгоритму для оптимізації параметрів лінійно-квадратичного регулятора динамічного відновлювача напруги, котрий дозволяє підтримувати рівень напруги на клемах підземних електроприймачів на стандартизованих рівнях при її відхиленнях. Це дозволило автоматизувати процес визначення вагових матриць стану і входу регулятора. Аналіз застосування різних цільових функцій під час оптимізації контролера динамічного відновлювача напруги підземного електроприймача, показав доцільність задіяння інтегральної абсолютної похибки, яка зумовлюється простотою і узагальненістю цього показника якості, що врахує і перергулювання, і час перехідного процесу.

4. Виконано оптимізацію матриць ваги стану і входу лінійно-квадратичного регулятора динамічного відновлювача напруги підземного електроспоживача за допомогою генетичного алгоритму. Проведено аналіз впливу параметрів алгоритму, як-то інтенсивність мутації параметрів контролера на якість еволюційного пошуку. Визначено, що інтенсивність

мутації матриці стану 2 і інтенсивності мутації матриці входу 0,5 протягом 200 генерацій генетичного алгоритму дозволяють досягти найліпшої якості перехідних процесів в каналах керування динамічного відновлювача напруги, підключеного до клем електроприймача підземного рудника, з мінімальним значенням інтегральної абсолютної похибки, що прямує до 0,03. При чому перерегулювання відсутнє практичної у всіх каналах керування, а час перехідного процесу скорочується не менше ніж на 95%, якщо співставляти з системою без засобів керування динамічним відновлювачем напруги.

5. Перевірено працездатність системи керування динамічним відновлювачем напруги для підтримання стандартизованих рівнів напруги на електроприймачі підземного рудника з оптимізованим генетичним алгоритмом лінійно-квадратичним регулятором у MATLAB/Simulink. Імітувалося виникнення в напрузі живлення в процесі її транспортування по внутрішнім ЛЕП таких відхилень показників якості напруги від стандартизованих значень, як її провали і стрибки. Отримані результати підтверджують ефективність задіяння створеної системи для компенсування відхилень напруги різного розмаху на індивідуальних електроприймачах підземних рудників, що чутливі до коливань якості напруги живлення. Проведене моделювання свідчить про доцільність впровадження запропонованого підходу в практику функціонування систем електропостачання гірничорудних підприємств з підземними способами видобутку залізної руди.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі на основі результатів експериментальних досліджень в умовах діючих підземних рудників з видобутку залізної руди, та теоретичних обґрунтувань стану показників якості електроенергії в системах електропостачання зазначених видів гірничих підприємств, вирішена наукова задача – підвищення ефективності функціонування СЕП підземних залізородних підприємств шляхом оперативної керованості станом локальних показників якості електроенергії. Виконані в дисертаційній роботі дослідження дозволяють сформулювати наступні узагальнені висновки:

1. Запропонований на основі експериментально-теоретичних досліджень, з врахуванням натурних експериментів в умовах сьогодення функціонування гірничорудних підприємств в Україні, варіант формування рейтингу «коректного формату» оцінювання рівнів впливу ПЯЕ на якість функціонування електроенергетичних комплексів: електропостачання – електроспоживання аналізуємих видів гірничих підприємств. В результаті аналізу реальних експериментальних досліджень встановлено, що найбільш впливовим по факту невідповідності рівнів ПЯЕ по відношенню до стандартних значень, серед інших виділяється показник відхилень напруги (ΔU) системах електропостачання зазначених видів підприємств. Це дозволило сформулювати відповідний варіант керованості процесом реагування на узагальнений комплекс показників якості електроенергії, котрі, і рівні котрих, визначені відповідними стандартами, що дозволить покращити в цілому якість електроенергії, котра живить споживачів.

2. Визначений рейтинг впливу показників якості електроенергії дозволив розробити концепцію, котра розширює межі реалізації заходів оперативного стримування ПЯЕ на рівнях стандартних значень, що дозволить оперативно проводити процес мінімізації їх відхилень шляхом локальних впливів на найбільш вагомні показники - відхилення напруги (ΔU).

3. Проведене дослідження дозволило встановити, як факт, випадковий характер споживання електроенергії та відповідні характеристики

рівнів ПЯЕ на підземних гірничорудних підприємствах. Випадкова характеристика електроспоживання аргументувала можливість застосування стохастичного підходу, щодо дослідження процесу якості електроспоживання загалом й теорії «викидів» окремо. Застосування системно-аналітичного підходу стало підґрунтям до формування багатофакторної моделі, в основі якої обґрунтовано доцільність представлення загальної якості електроенергії, що споживається, як сукупність частинних показників якості спожитої електроенергії. Це дозволило дослідити залежність загальної якості електроенергії від величин частинної її якості при заданих величинах параметрів. Застосування відповідної кількості статистичних даних дозволило провести ідентифікацію параметрів запропонованої моделі.

4. Застосування статистичних методів при дослідженні викидів в електропостачанні щодо оцінювання якості містять наукову новизну. На основі проведених досліджень запропонована методика оцінювання якості електричної енергії, в основу якої покладено аналіз викидів потужності за заданий рівень. На основі сформованої багатофакторної моделі проведена мінімізація загальної вартості електроенергії шляхом оптимізації величин вартостей частинних її якостей. Практика застосування моделі довела її доцільність – очікуєма вартість сплати за спожиту електроенергію при дотриманні ПЯЕ на стандартних рівнях, повинна очікувано зменшитись практично у два рази. Запропонований підхід ґрунтується на всебічності дослідження якості електричної енергії й визначає синергію вартісно-цільових складових й параметрів якості споживання електроенергії.

5. Здійснено обґрунтування доцільності застосування динамічного відновлювача напруги для оперативної компенсації коливань напруги з різним розмахом в електромережах підземних рудників. На підставі аналізу схем підключення динамічного відновлювача напруги обрано індивідуальну схему компенсації відхилень для чутливого підземного електроприймача. Визначено спосіб керування напругою, який забезпечує стабілізацію і амплітуди, і фази напруги живлення. Розроблена просторово-станна математична модель

динамічного відновлювача напруги, котра враховує фізичні процеси, що у ньому протікають. Модель дозволяє досліджувати динаміку системи і оптимізувати систему автоматизованого керування рівнем напруги живлення індивідуального споживача рудника.

6. Проведено дослідження динамічних властивостей динамічного відновлювача напруги з розімкненою і замкненою за зворотнім зв'язком за станом системами автоматизованого керування, що дало змогу провести оцінювання характеру перехідних процесів. Застосування методу розміщення полюсів матриці підсилення зворотного зв'язку за станом дозволило значно зменшити перерегулювання та час перехідного процесу, якщо співставляти з розімкненою системою. Водночас значення ключового показника якості – перерегулювання перевищувало стандартизовані значення для всіх каналів керування. Це зумовило необхідність впровадження оптимального контролера – лінійно-квадратичного регулятора, ефективного для керування систем, що описані просторово-станною моделлю, як-то динамічний відновлювач напруги.

7. Розроблений метод оптимального налаштування лінійно-квадратичного регулятора на базі генетичного алгоритму, котрий дозволяє автоматизовано встановлювати вагові матриці стану і входу шляхом визначення критерію якості керування – інтегральної абсолютної похибки. Експериментально встановлені параметри еволюційного пошуку, як-то інтенсивність мутації вагових матриць стану і керування лінійного квадратичного контролера, що забезпечують мінімізацію інтегральної абсолютної похибки, і, у наслідку, відсутність перерегулювання (наявні перерегулювання в певних каналах становили на більше 0,058 %) та суттєве зменшення часу перехідного процесу (до 95 %), якщо співставляти з іншими розглянутими в науковому пошуку системами керування.

8. Проведене моделювання у MATLAB/Simulink підтвердило ефективність створеної системи оперативного керування рівнем напруги на базі динамічного відновлювача напруги з лінійно-квадратичним регулятором

налаштованим генетичним алгоритмом в умовах характерних для підземних рудників коливань напруги, що свідчить про доцільність майбутнього практичного впровадження.

9. Розроблена методологія оцінювання ПЯЕ та формат розбудови системи підтримання їх реальних значень на стандартних рівнях пропонується до втілення в формат технології розбудови та функціонування узагальнення комплексів керування режимами роботи системи електропостачання підземних залізородних шахт, як складових в управлінських діях процесом електроспоживання даних видів підприємств.

10. Втілення наукових розробок, які були отримані та викладені в дисертаційній роботі, за даними спеціалізованих підприємств із розробки і впровадження сучасних форматів систем електропостачання в практику роботи підземних гірничорудних підприємств дозволить отримати очікуваний економічний ефект в обсязі 15,5 – 18,27 млн. грн. на рік у цінах 2025 року (Додаток Є), а втілення їх в процес підготовки фахівців – здобувачів 1-го, 2-го та 3-го рівнів отримання вищої освіти дозволить підвищити якість підготовки останніх (Додаток Є).

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Білоцерковець О.Г. Економіка України: шокові впливи та шлях до стабільного розвитку / О.Г. Білоцерковець, Т.В. Бурлай, Н.Ю. Гончар та ін. : за ред. І.В. Крючкової. НАН України, Інститут економіки та прогнозування. Київ : 2010. 480 с.
2. Енергетична стратегія України на період до 2035 р. // Сайт Міністерства енергетики та вугільної промисловості України: [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://mpe.kmu.gov.ua>.
3. Єрмілов С.Ф. *Енергетична стратегія України на період до 2030 року проблемні питання змісту та реалізації*: [Енергозбереження, енергоефективність в Україні] / Єрмілов С.Ф. // Енергоінформ. – 2006. - №48 (28.11 – 04.12) с. 3 – 4.
4. Вілкул Ю.Г., Азарян А.А., Колосов В.О. Сучасний стан гірничо – видобувної промисловості України. Гірничий вісник. Науково – технічний збірник. Кривий Ріг. Випуск 110, 2022, с. 3 – 9.
5. Капленко Ю.В., Янов Е.В. *Влияние глубины горных работ на технико – экономические показатели подземной добычи руды*, Вісник КТУ, Кривий Ріг, №5 (15), с. 25 – 28, 2006.
6. Ступник М.І., Письменний С.В. *Перспективные технологические варианты дальнейшей обработки железнорудных месторождений* / Вісник Криворізького національного університету. Збірник наукових праць КНУ. Випуск 30, м. Кривий Ріг, 2012, с. 3 – 7.
7. Бабець Є.К., Мельникова І.Є., Гребенюк С.Я., та Лобов С.П. *Дослідження техніко – економічних показників гірничодобувних підприємств України та ефективність їх роботи в умовах змінної кон'юктури світового ринку залізорудної сировини*. Кривий Ріг, Україна: Вид. Козлов Р.А., 2015.
8. Вілкул Ю.Г., Азарян А.А., Колосов В.А., Караманиць Ф.І., Батареев А.С. *Сучасний стан залізорудної галузі, прогноз розвитку та пропорції* / Качество минерального сырья. Сб. науч. тр., т. 1, 2017, с. 9 – 24.

9. Ступнік М.І., Федько М.Б., Письмений С.В., Колосов В.О., Курносов С.А. & Маланчук З.Р. (2018). Проблеми розкриття та підготовки рудних родовищ на глибоких горизонтах шахт Кривбасу. Вісник Криворізького національного університету, 47, с. 3 – 8. <https://doi.org/10.31721/2306-5451-2018-1-47-3-8>

10. Ступнік М.І., Федько М.Б., Письмений С.В., Колосов В.О., Курносов С.А., Маланчук З.Р. *Проблеми розкриття та підготовки рудних родовищ на глибоких горизонтах шахт Кривбасу*, Вісн. Криворізького нац. ун – ту. Зб. наук. пр., №47, 2018, с. 3 – 8.

11. Колосов В.А. *Повышение качества железнорудной промышленности и показателей работы шахт на основе совершенствования технологии добычи и переработки*, дис. докт. техн. наук, КТУ, Кривой Рог, Украина, 2002.

12. Сінчук І., Котякова М. Підхід до покращення якісних показників електроенергії залізорудних підприємств. *Вісник Криворізького національного університету*. 2023. Вип. 57. С. 43-52. DOI: <https://doi.org/10.31721/2306-5451-2023-1-57-43-52>

13. Сінчук О.М., Сьомочкін А.Б., Барановська М.Л., Кобеляцький Д.В. *До проблеми покращення якості електричної енергії у внутрішньо шахтних електричних мережах шляхом її переводу на підвищені рівні напруги*. Матеріали Міжнародна науково – технічна конференція «Розвиток промисловості та суспільства», Кривий Ріг, 2023, 56 с.

14. Сінчук О.М., Берідзе Т.М., Касаткіна І.В., Пересунько І.І. Етіологія ефектів моніторингу в парадигмі оцінювання стратегії розвитку залізорудного підприємства, Вісник Криворізького національного університету. Збірник наукових праць, Випуск 57, 2023, с. 8 – 11.

15. Жежеленко И.В. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях. – 2 – е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 168 с. ил. (Экономия топлива и электроэнергии).

16. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://ukrstat.gov.ua/> , <https://greendealukraina.org/gd-tracker/figure-of-the-week/2024/ukraine-electricity-generation-2023-2022>
17. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://ua.energy/general-news/ukraine-has-applied-to-join-entso-e-as-soon-as-possible-due-to-high-technical-readloneess-kudrytsky/>
18. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/iron-ore-statistics-and-information> , <https://ukrstat.gov.ua/> , <https://gmek.center.ua>
19. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.ukrinform.ua/rubric-economy/3383959-v-ukraini-zroslo-virobnictvo-cavunu-i-stali-na-36.html> , <https://forbes.ua/news/v-ukraini-zroslo-virobnitstvo-chavunu-stali-ta-prokatu-v-pershomu-pivrichchi-08072024-22260> , <https://delo.ua/industry/v-i-pivricci-2024-roku-ukraina-zbilsila-virobnictvo-cavunu-na-37-prokatu-na-32-434155/>
20. Малахов Г.И., Мартынов В.К., Фаустов Г.Г., Крузвенко И.А. *Основные расчеты систем разработки рудных месторождений* / Под общей редакцией Малахова Г.М. М.: Недра, 1968, 275 с.
21. Довгий С.О., Иванченко В.В., Коржнев М.М., Трофимчук О.М., Яковлев Є.О. та ін. *Дослідження екологічного стану території пост-мійнінгу в Україні на прикладі Криворізького басейну та його оточення*. Ніка Центр, 2021, 196 с.
22. Вілкул Ю.Г., Азарян А.А., Колосов В.О, *Сучасний стан гірничо – вдобувної промисловості України*. Гірничий вісник. Науково – технічний збірник, Кривий Ріг, Випуск 110, 2022, с. 3 – 9.
23. Сінчук І.О. (2019). *Методологічні засади оцінювання електроефективності залізорудних підприємств: монографія*, ПП Щербатих, 284 с.

24. Яловая А.Н. Электроэнергоеффективность и методы повышения при подземном способе добычи железорудного сырья, дис. на соиск. уч. степени к.т.н., Кривой Рог, 2015.

25. Жовтянський В.А. *Стратегія енергозбереження в Україні: Аналітико – довідкові матеріали в 2 – х томах: Механізм політики енергозбереження* / За ред. Жовтянського В.А., Кулика М.М., Стогнія Б.С. – К: Академперіодика, 2006. – 600 с.

26. 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.

27. O. Sinchuk, R. Strzelecki, T. Beridze, I. Peresunko, V. Baranovskyi, D. Kobeliatskyi, and V. Zapalskyi. Model studies to identify input parameters of an algorithm controlling electric supply/consumption process by underground iron ore enterprises. *Mining of Mineral Deposits*, Volume 17, no. 3, 2023, pp. 93-101, <https://doi.org/10.33271/mining17.03.093>.

28. 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.

29. Сінчук І.О, Коментар до стану електроенергетики залізрудних підприємств як сегмента їх конкурентоспроможності: монографія – Кременчук: ЧП Щербатих А.В. – 2018. – 166 с.

30. 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.

31. 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.

32. 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>

33. Kotyakova M.H. Aspects of development of modern management systems for improving the quality of electric energy in distribution networks of iron enterprises: Monograph. Edited by Associate Professor Sinchuk I.O. – Warsaw: iScience Sp. z. o. o. – 2023. – 61 p.

34. Igogo T., Awuah – Offei K., Newman A., Lowdet T., Engel – Cox J. (2021). Integrating renewable energy into mining operations: Opportunities, challenges, and enabling approaches. Applied Energy, 300, 117375. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117375>.

35. Sinchuk I., Mykhailenko O., Kupin A., Ilchenko O., Budnikov K., & Baranovskyi, V. (2022). 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), Kyiv, Ukraine, 2022, 116 – 122. <https://doi.org/10.1109/ESS57819.2022.9969263>.

36. Marsden O. & Marsden J.O. (2021). Potential Pathways for Mining Operations to Transition to Renewable Energy – a Case Study. Mining, Metallurgy&Exploration, 38, 1689 – 1699. <https://doi.org/10.1007/s4246-021-00440-9>.

37. Issa M., Ilinca A., Rousse D.R., Boulon L.&Groleau P. (2023). Renewable Energy and Decarbonization in the Canadian Mining Industry: Opportunities and Challenges. Energies, 16(19), 6967. <https://doi.org/10.3390/en16196967>.

38. Moran L., Sbarbaro – Hofer D.G., Ortega F.&Espinoza J.R. (2019). Electrical energy consumption characterization of open – pit mining and mineral

processing operation towards the use of renewable energy sources. 2019 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, Baltimore, MD, USA, 2019, p. 1 – 6, <https://doi.org/10.1109/IAS.2019.8911978>.

39. Ghahramani M., Habibi D., Ghamari S.M.&Aziz A. (2024). Addressing Uncertainty in Renewable Energy Integration for Western Australia`s Mining Sector: A Robust Optimization Approach. *Energies*, 17(22), 5679. <https://doi.org/10.3390/en17225679>.

40. Шкрабець Ф.П., Плешков П.Г. Основи електропостачання : навч. посібн. Кіровоград : РВЛ КНТУ, 2010. 408.

41. Tan R. H. G.&Ramachandaramurthy V.K. (2015). A Comprehensive Modeling and Simulation of Power Quality Disturbances Using MATLAB/SIMULINK. In *Power Quality Issues in Distributed Generation*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/61209>.

42. Hussein A. & Hawas M. (2019). Power quality analysis based on simulation and MATLAB/Simulink. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 16(3), 1144 – 1153. <https://doi.org/10.11591/ijeecs.v16.i3.pp1144-1153>.

43. Zhang J., Sheng T., Gu P., Yu M., Wu H., Sun J. & Bao J. (2024). Comprehensive Power Quality Assessment Based on a Data – Driven Determinant – Valued Extension Hierarchical Analysis Approach. *Energies*, 17, 3141. <https://doi.org/10.3390/en17133141>.

44. Bajaj M., Singh A.K., Alowaidi M.A., Sharma N.K., Sharma S.K. & Mishra S. (2020). Power Quality Assesment of Distorted Distribution Networks Incorporating Renewable Distributed Generation Systems Based on the Analytic Hierarchy Process. *IEEE Access*, 8, 145713 – 145737. <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp&tp=&arnumber=9159570>.

45. Yin J., Du X., Yuan H., Ji M., Yang X., Tian S., Wang Q. & Liang Y. (2021). TOPSIS Power Quality Comprehensive Assesment Based on A Combination Weighting Method. 2021 IEEE 5th Conference on Energy Internet and

Energy System Integration (EI2), Taiyuan, China, 2021, 1303 – 1307.
<https://doi.org/10.1109/EI252483.2021.9713201>.

46. Shi H., Li Y., Jiang Z. & Zhang J. (2021). Comprehensive power quality evaluation method of microgrid with dynamic weighting based on CRITIC. *Measurement and Control*, 54(56), 1097 – 1104.
<https://doi.org/10.1177/00202940211016092>.

47. Yang F., Shen Y., Cui X., Wu J., Yin Z., Wang Y., Wu Y. & Dong Y. (2018). Voltage Sag Severity Assessment Based on Multi – Objective Decision Analytic Hierarchy Process. 2018 2nd IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2), Beijing, China, 2018. p. 1 – 6.
<https://doi.org/10.1109/EI2.2018.8582402>.

48. Shen C. & Hu L. (2020). Power quality comprehensive evaluation method based on fuzzy mathematics and cloud theory. *Journal of Physics: Conference Series*. 1684012136. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1684/1/01236>.

49. Ding H., Liu P., Chang X. & Zhang B. (2023). A Novel Power Quality Comprehensive Estimation Model Based on Multi – Factor Variance Analysis for Distribution Network with DG. *Processes*, 11, 2385.
<https://doi.org/10.3390/pr11082385>.

50. Shi H., Su G., Pan J., Feng K. & Zhou J. (2022). A novel microgrid power quality assessment model based on multivariate Gaussian. *IET Power Electron*, 16, 145 – 156. <https://doi.org/10.1049/pel2.12370>.

51. Liu M., Chen Y., Zhang Z. & Deng S. (2023). Classification of Power Quality Disturbance Using Segmented and Modified S – Transform and DCNN – MSVN Hybrid Model. *IEEE Access*, 11, pp. 890 – 899.
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3233767>.

52. Wang M., Deng Z., Zhang Y. & Zhu Z. (2023). An Automatic Identification Framework for Complex Power Quality Disturbances Based on Ensemble CNN. *IEEE Access*, 11, pp. 56550 – 56560.
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3273294>.

53. Khetarpal P. & Tripathi, M.M. (2023). Classification of Power Quality Disturbances Using Semi – supervised Deep Belief Networks. Journal of Electrical Engineering & Technology, 18, pp. 3191 – 3200. <https://doi.org/10.1007/s42835-023-01423-0>.

54. Zhou L., Gu S., Liu Y. & Zhu C. (2024). A novel recognition method for complex power quality disturbances based on Markov transition field and improved densely connected network. Frontiers in Energy Research, 12, 1328994. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2024.1328994>.

55. Liao X., Chen C., Wang Y., Cuil M. & Liu C. (2020). Identification of Power Quality Disturbances Based on Sample Entropy and Weighted Optimization Random Forest. Journal of Physics: Conference Series, 1486, 062018. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1486/6/062018>.

56. Жежеленко І. В. Оцінка втрат електричної енергії, викликаних зниженням її якості / І. В. Жежеленко, В. В. Нестерович // Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія : Технічні науки. 2017. - Вип. 34. - С. 119-126. Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vpdy_2017_34_19

57. Півняк Г. Г. Енергетична ефективність систем електропостачання [Текст] : монографія / Г. Г. Півняк, І. В. Жежеленко, Ю. А. Папаїка; М-во освіти і науки України, Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка». – 2-ге вид., переробл. і допов. – Дніпро: НТУ «ДП», 2018. – 148 с.

58. Жежеленко І. В. Аналіз факторів, впливаючих на енергетичну ефективність систем електропостачання / І. В. Жежеленко, В.Е. Саравас, Г. Г. Трофимов // Енергетика та електропостачання промислових підприємств. Енергетичний менеджмент. 2017. №1 (37). Кременчук: КНТУ ім. М. Остроградського, 2017. С.56-62.

59. Жежеленко І. В., Папаїка Ю. А., Луценко І. М., Лисенко О. Г. Оцінка стану якості напруги у промислових системах електропостачання. // Гірничу електромеханіку та автоматизацію. №103. 2020. С. 26-31.

60. Щетка В. Ф. и др. *Разработка и внедрение высокоэффективных систем электроснабжения шахт с переходом на большие глубины в условиях интенсификации горных работ, увеличения единичных мощностей и использования тиристорных преобразователей.* Отчет по НДР (заключительный) (№ 01821027681). Кривой Рог : Криворожский горнорудный институт, 1981. 215 с.

61. Щетка В. Ф. и др. *Разработать и выдать рекомендации по созданию рациональных схем электроснабжения и электрооборудования для перевода железорудных шахт на повышенное напряжение 660-1000 В.* Отчет по НДР (№ 01821027681). Кривой Рог : Криворожский горнорудный институт, 1983. 82 с.

62. Осадчук Ю. Г. и др. *Разработка технико-экономического обоснования реконструкции схемы электроснабжения ГПП-4 и ГПП-5 цеха сетей и подстанций.* Звіт по НДР (шифр 0108U010905). Кривий Ріг : Криворізький технічний університет, 2009. 52 с.

63. Сінчук О. М. Розроблення комплексу заходів по енергозбереженню на підприємствах залізорудної промисловості: звіт про НДР (шифр 0114U03457). - Кривий Ріг: Криворізький національний університет, 2015. - 275 с.

64. Сінчук О. М. Розроблення енергозберігаючих заходів на підприємствах гірничодобувної промисловості: звіт про НДР (шифр 0115U03180). - Кривий Ріг: Криворізький національний університет, 2016. - 136 с.

65. Сінчук О. М. Інтеграція розумних технологій побудови електроенергетичних систем у контексті підприємств гірничо-металургійної галузі: звіт про НДР (шифр 0121U11709). - Кривий Ріг: Криворізький національний університет, 2021. - 165 с.

66. СОУ НЕК 03.120.4 – 14:2019. Забезпечення контролю і дотримання показників якості електричної енергії у процесі її передачі магістральними та міждержавними електричними мережами ДП НЕК

Укренерго. [Чинний від 07-06-2019]. Вид. офіц. Київ: ДП «НЕК Укренерго», 2019, 184 с.

67. ДСТУ EN 50160:2014. Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності (EN 50160:2010, IDT). [Чинний від 01-10-2014]. Вид. офіц. Київ: Мінекономрозвитку України, 2014, 32с.

68. ДСТУ ISO 50015:2016. Системи енергетичного менеджменту. Вимірювання та верифікація рівня досягнутої / досяжної енергоефективності організацій. Загальні принципи та настанова (ISO 50015:2016, IDT). [Чинний від 01-09-2016]. Вид. офіц. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2016, 50 с.

69. ДСТУ ISO 50006:2016. Системи енергетичного менеджменту. Вимірювання рівня досягнутої / досяжної енергоефективності з використанням базових рівнів енергоспоживання та показників енергоефективності. Загальні положення та настанова (ISO 50006:2014, IDT). [Чинний від 01-09-2016]. Вид. офіц. Київ: Держспоживстандарт України, 2016, 52 с.

70. Берідзе Т.М. *Дослідження критеріїв оцінювання якісних показників електропостачання промислових підприємств* / Берідзе Т.М., Касаткіна І.В., Бойко С.М. // Вісник Криворізького національного університету: зб. наук, праць, Кривий Ріг, вип. 57, с. 121 - 127.

71. Umberto Amato, Anestis Antoniadis, Italia De Feis, Yannig Goude, Audrey Lagach. Forecasting high resolution electricity demand data with additive models including smooth and jagged components. International Journal of Forecasting. Volume 37, Issue 1, January-March 2021, P. 171-185.

72. Лихач, М.Л. Угрюмов , Д.О. Шевченко, С.І. Шматков. Методи виявлення викидів в пробних вибірках при управлінні процесами в системах за станом. Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна серія «Математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління», випуск 53, 2022 С. 21-40.

73. Шкодирєв В.П., Ягафаров К.І., Баштовенко В.А., Ільїна Є.Е. Огляд методів виявлення аномалій в потоках даних. URL: http://ceur-ws.org/Vol-1864/paper_33.pdf
74. Pang G. and jther. Deep Learning for Anomaly Detection // ACM Computing Surveys. 2021. Т. 54. Мі 2. Р. 1-38.
75. 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.
76. Жильцов О. Б. *Теорія ймовірностей та математична статистика у прикладах і задачах*: навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл. / Жильцов О.Б.; за ред. Михайліна Г.О., К: Київ, ун - т ім. Б. Грінченка, 2015, 336 с.
77. Огірко О. І., Галайко Н. В. Теорія ймовірностей та математична статистика: навчальний посібник / О. І. Огірко, Н. В. Галайко. – Львів: ЛьвДУВС, 2017. – 292 с.
78. Статистичний аналіз даних вимірювань: навч. посіб. / Єременко В.С., Куц Ю.В., Мокійчук В.М., Самойліченко О.В. - К.: НАУ, 2013 - 320 с.
79. Бокс Дж. Анализ временных рядов. Прогноз и управление: вып. 1 (пер. с англ. Левшина А.А.) / Бокс Дж., Дженкинс Г. - М.: Мир, 1974. - 406 с.
80. Кепич Т. Ю. Основи теорії подібності та аналізу розмірностей та їх застосування в задачах механіки : навч. посібник / упорядники: Т. Ю. Кепич та О. Г. Куценко. Київ : КНУ ім. Тараса Шевченка, 2004. 100 с.
81. Єріна А. М. Поєднання моделей регресійного і дисперсійного аналізу в соціально-економічних дослідженнях/ А. М. Єріна // Наукові записки НаУКМА. Серія: Економічні науки. - 2000. - Том 18. - С. 12-17.
82. Стеценко І. В. Моделювання систем /І. В. Стеценко. - Черкаси : ЧДТУ, 2010. 399 с.
83. Bjorck A. Numerical methods for least squares problems. Philadelphia : SIAM. 1996. 427 p. ISBN 0-89871-360-9.

84. Rouaud M. Probability, Statistic and Estimation. Propagation of Uncertainties in Experimental Measurement. 2013. 191 c. <https://www.incertitudes.fr/book.pdf>
85. Farhadi-Kangarlu, M., Babaei, E., & Blaabjerg, F. (2017). A comprehensive review of dynamic voltage restorers. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 92, 136-155. <https://doi.Org/10.1016/j.ijepes.2017.04.013>
86. Moghassemi, A., & Padmanaban, S. (2020). Dynamic Voltage Restorer (DVR): A Comprehensive Review of Topologies, Power Converters, Control Methods, and Modified Configurations. Energies, 13(16), Article 16. <https://doi.org/10.3390/en13164152>
87. Prasad, D., & Dhanamjayulu, C. (2022). A Review of Control Techniques and Energy Storage for Inverter-Based Dynamic Voltage Restorer in Grid- Integrated Renewable Sources. Mathematical Problems in Engineering, 2022(1), 6389132. <https://doi.org/10.1155/2022/6389132>
88. Remya, V. K., Parthiban, P., Ansal, V., & Babu, B. C. (2018). Dynamic Voltage Restorer (DVR) - A Review. Journal of Green Engineering, 8(4), 519-572. <https://doi.org/10.13052/jgel.904-4720.844>
89. Madhusudan, R., & Ramamohan Rao, G. (2012). Modeling and simulation of a Dynamic Voltage Restorer (DVR) for power quality problems-voltage sags and swells. IEEE-International Conference On Advances In Engineering, Science And Management (ICAESM -2012), 442-447. <https://ieeexplore.ieee.org/document/6216155>
90. Perera, K., Salomonsson, D., Atputharajah, A., & Alahakoon, S. (2006). Automated Control Technique for a Single Phase Dynamic Voltage Restorer. 2006 International Conference on Information and Automation, 63-68. <https://doi.org/10.1109/ICINFA.2006.374153>
91. М. Беззуб, О. Бялобржеський, О. Тодоров (2023). Дослідження розподілу гармонічних компонентів потужності в силовій схемі динамічного

відновлювача напруги. Електротехніка та електроенергетика, 1, 19-29.

<https://doi.org/10.15588/1607-6761-2023-1-2>

92. Ochoa-Gimenez, M., Roldan-Perez, J., Garcia-Cerrada, A., & Zamora-Macho, J. L. (2015). Efficient multiple-reference-frame controller for harmonic suppression in custom power devices. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 69, 344-353. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2015.01.013>

93. Brito, M. E. C., Cavalcanti, M. C., Limongi, L. R., & Neves, F. a. S. (2012). Low Cost Dynamic Voltage Restorer. *Renewable Energy & Power Quality Journal*, 10(3). <https://doi.org/10.24084/repqi.10.320>

94. Kim, H., Kim, J.-H., & Sul, S.-K. (2004). A design consideration of output filters for dynamic voltage restorers. 2004 IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference, 6, 4268-4272.

<https://doi.org/10.1109/PESC.2004.1354755>

95. А.М. Сільвестров, М.Я. Островерхов, О.В. Шефер, Н.А. Ладик, Д.К. Зіменков (2023). Сучасні системи автоматичного керування технологічними комплексами. КПП ім. Ігоря Сікорського. 386.

96. Новицький І. В., Ус С. А. (2017). Сучасна теорія керування. НГУ. 263.

97. Venkateswarlu, Ch., & Karri, R. R. (Eds.). (2022). *Optimal State Estimation for Process Monitoring, Fault Diagnosis and Control*. 382/ Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85878-6.00Q23-3>

98. Roldan-Perez, J., Garcia-Cerrada, A., Rodriguez-Cabero, A., & Zamora-Macho, J. L. (2018). Comprehensive Design and Analysis of a State-Feedback Controller for a Dynamic Voltage Restorer. *Energies*, 11(8), 1972. <https://doi.org/10.3390/en11081972>

99. Dias De Oliveira Evald, P. J., Mor, J. L., & Azzolin, R. Z. (2016). A pole placement control by states feedback based on State Variable Filter. *IECON 2016 - 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 25-30. <https://doi.org/10.1109/IECON.2016.7793506>

100. Ganesh, S. N. V., Ramesh Reddy, K., & Shankar, B. V. (2009). Comparison of different control strategies for cascaded multilevel inverter based dynamic voltage restorer for power quality improvement. *International Journal on Electronic and Electrical Engineering*, 07(11), 16-26.
101. Pumawan, H., Mardlijah, & Purwanto, E. B. (2017). Design of linear quadratic regulator (LQR) control system for flight stability of LSU-05. *Journal of Physics: Conference Series*, 890(1), 012056. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/890/1/012056>
102. Setiawan, N., & Pratama, G. N. P. (2021). Application of LQR Full-State Feedback Controller for Rotational Inverted Pendulum. *Journal of Physics: Conference Series*, 2111(1), 012006. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2111/1/012006>
103. Sir Elkhatem, A., & Naci Engin, S. (2022). Robust LQR and LQR-PI control strategies based on adaptive weighting matrix selection for a UAV position and attitude tracking control. *Alexandria Engineering Journal*, 61(8), 6275-6292. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2021.11.057>
104. Conte, G. Y. C., Marques, F. G., & Garcia, C. (2021). LQR and PID Control Design for a Pneumatic Diaphragm Valve. 2021 IEEE International Conference on Automation/XXIV Congress of the Chilean Association of Automatic Control (ICA-ACCA), 1-7. <https://doi.org/10.1109/ICAACCA51523.2021.9465250>
105. Vishal, & Ohri, J. (2014). GA tuned LQR and PID controller for aircraft pitch control. 2014 IEEE 6th India International Conference on Power Electronics (IICPE), 1-6. <https://doi.org/10.1109/IICPE.2014.7115839>
106. Magaji, N., Hamza, M., & Dan-Isa, A. (2012). Comparison of GA and LQR tuning of static VAR compensator for damping oscillations. *International Journal of Advances in Engineering & Technology*, 2(1), 594-601.
107. Marada, T., Matousek, R., & Zuth, D. (2017). Design of Linear Quadratic Regulator (LQR) Based on Genetic Algorithm for Inverted Pendulum. *MENDEL*, 23(1), 149-156. <https://doi.org/10.13164/mendel.2017.1.149>

108. Abdullah, A. I., Mahmood, A., & Thanoon, M. A. (2023). Design of a Linear Quadratic Regulator Based on Genetic Model Reference Adaptive Control. *Journal of Automation, Mobile Robotics and Intelligent Systems*, 16(3), 75-81. <https://doi.org/10.14313/jamris/3-2022/26>
109. Hassanat, A., Almohammadi, K., Alkafaween, E., Abunawas, E., Hammouri, A., & Prasath, V. B. S. (2019). Choosing Mutation and Crossover Ratios for Genetic Algorithms-A Review with a New Dynamic Approach. *Information*, 10(12), 390. <https://doi.org/10.3390/inf0120390>
110. Immanuel, S. D., & Chakraborty, U. Kr. (2019). Genetic Algorithm: An Approach on Optimization. 2019 International Conference on Communication and Electronics Systems (ICCES), 701-708. <https://doi.org/10.1109/ICCES45898.2019.9002372>
111. Wright, A. H. (1991). Genetic Algorithms for Real Parameter Optimization. In G. J. E. Rawlins (Ed.), *Foundations of Genetic Algorithms* (Vol. 1, pp. 205-218). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-050684-5.50016-1>
112. Asif Jamadar (2025). Three-Phase Dynamic Voltage Restorer (DVR) using Fuzzy Logic
<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/162061-three-phase-dynamic-voltage-restorer-dvr-using-fuzzy-logic>, MATLAB Central File Exchange. Retrieved March 27, 2025.
113. Srikanth Dakoju (2025). Series Active Filter (Dynamic Voltage Restorer (DVR))
<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/51064-series-active-filter-dynamic-voltage-restorer-dvr>, MATLAB Central File Exchange. Retrieved March 26, 2025.
114. Venkata Bari Prasadu (2025). DVR
<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/14603-dvr>, MATLAB Central File Exchange. Retrieved April 6, 2025.

115. 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. <https://doi.org/10.29227/im-2025-01-19> (Scopus)
116. 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. (Scopus)
117. 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>
118. 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>
119. Сінчук І., Котякова М. Дослідження несиметричних режимів трифазних чотирипровідних мереж з розосередженою генерацією. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences*. 2022. № 5(313). С. 233-237. DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2022-313-5-233-237>
120. Козакевич І., Котякова М. Аналіз впливу джерел розосередженої генерації на якість електричної енергії. *Вісник Криворізького національного університету*. 2021. Вип. 52. С. 175-179. DOI: <https://doi.org/10.31721/2306-5451-2021-1-52-175-179>

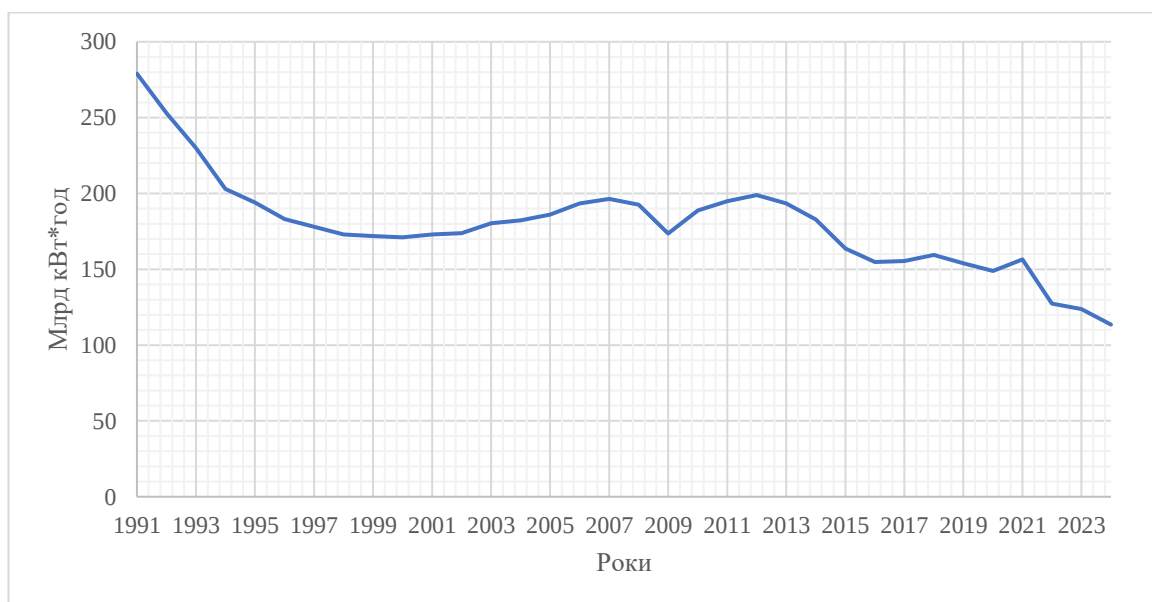
ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

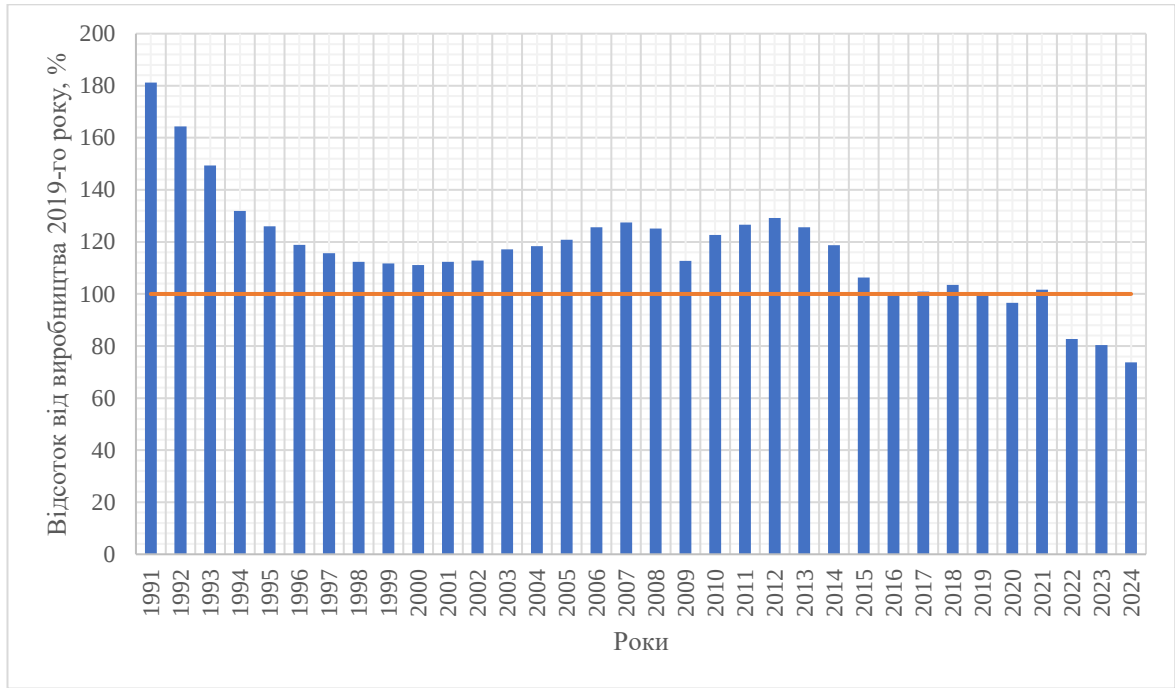
Основні показники функціонування гірничо-металургійної та енергетичної
галузей України

На рис. Д.А.1 наведено обсяги виробництва, а на рис. Д.А.2 встановлені потужності генерації ЕЕ в Україні [16-19]. З рисунка вочевидь, що показник виробництва електроенергії в державі за останні роки знизився майже на 40%. В той же час споживання ЕЕ промисловими підприємствами держави знизилось в наближенні до 35% (рис. Д.А.3). В певному сенсі порівняння першого та другого показника носить ознаку дисбалансу.

Це факт нестійкого функціонування ЕС України в цілому та її складових зокрема, що прямо віддзеркалюється на роботі гірничодобувних підприємств, з лютого місяця 2022 року, коли в результаті виводу з ладу ряду суб'єктів генерації ЕЕ держава і її базові в загальнодержавній економіці підприємства обмежені лімітами добових рівнів споживання даного виду енергії. Окрім цих обмежень підприємства вимушено повинні враховувати варіативність «жорстких» погодинних в добі тарифів на ЕЕ, котрі характеризуються своєю постійною погодинною та добовою мінливістю (рис. Д.А.7). Так, в окремі години доби стабільно погодинна різниця в сплаті (тарифів) за електроенергію споживачами сягає майже 20-ти разів. Приближеність до такої ситуації спостерігається в більшості своїй на протязі значного періоду часу.

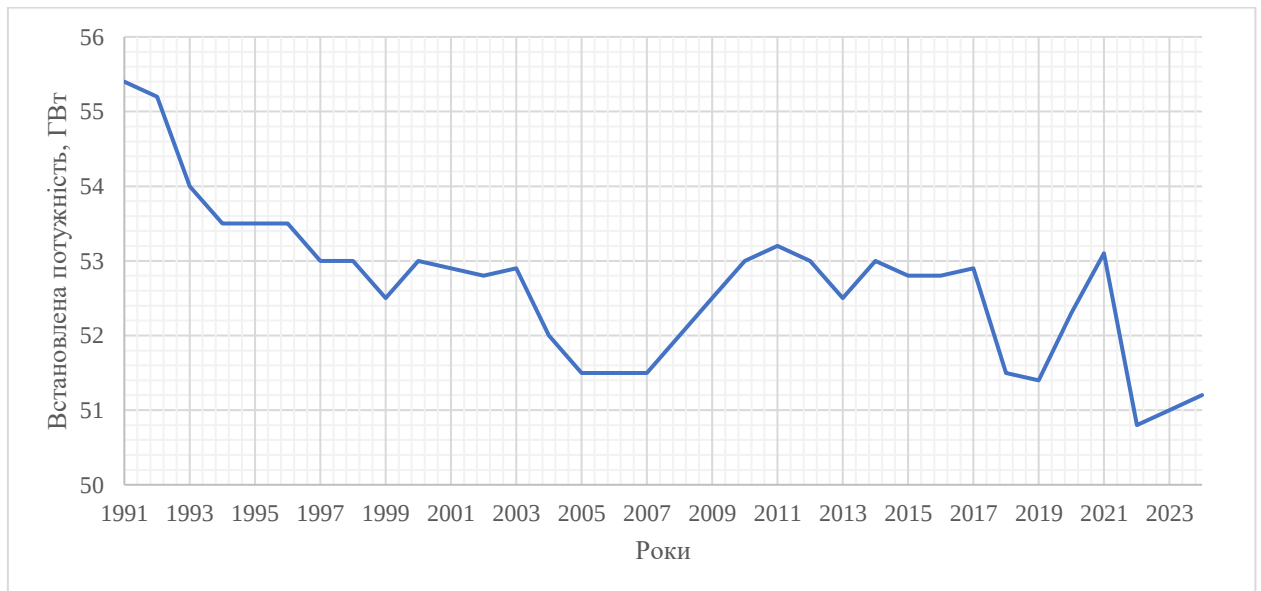


а)

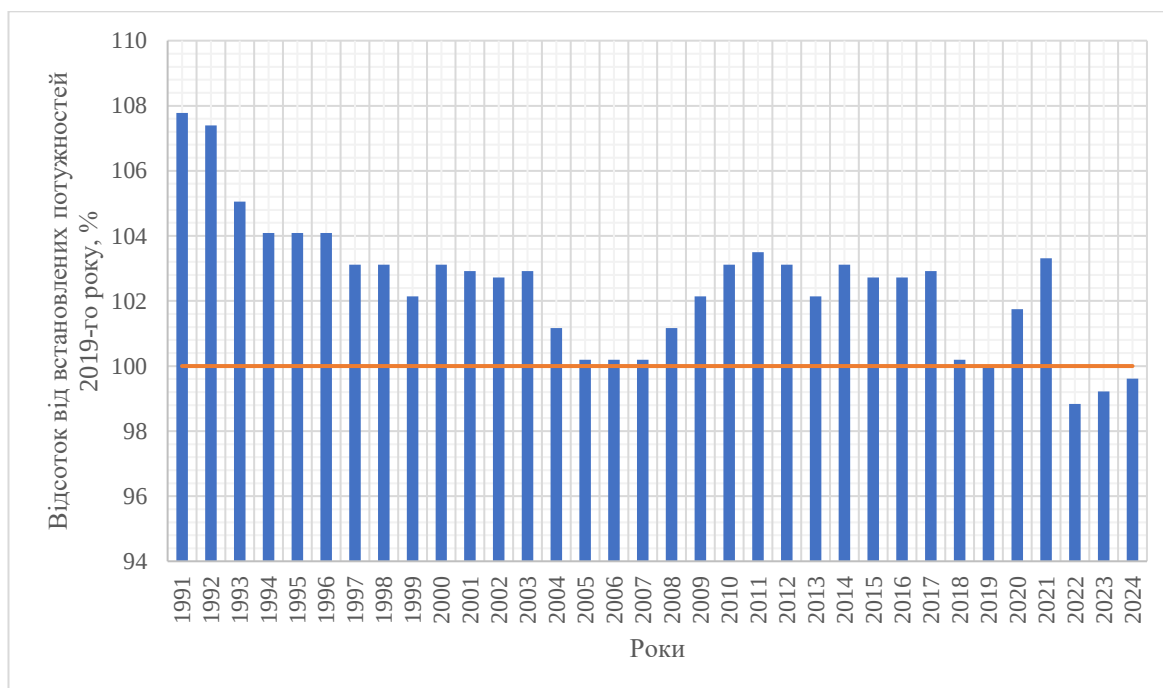


б)

Рисунок Д.А.1 – Обсяги генерації електроенергії в Україні за роками (а) та у порівнянні з 2019м роком (б)



а)



б)

Рисунок Д.А.2 – Встановлена потужність електричних станцій України за різні роки (а) та у порівнянні з 2019-м роком

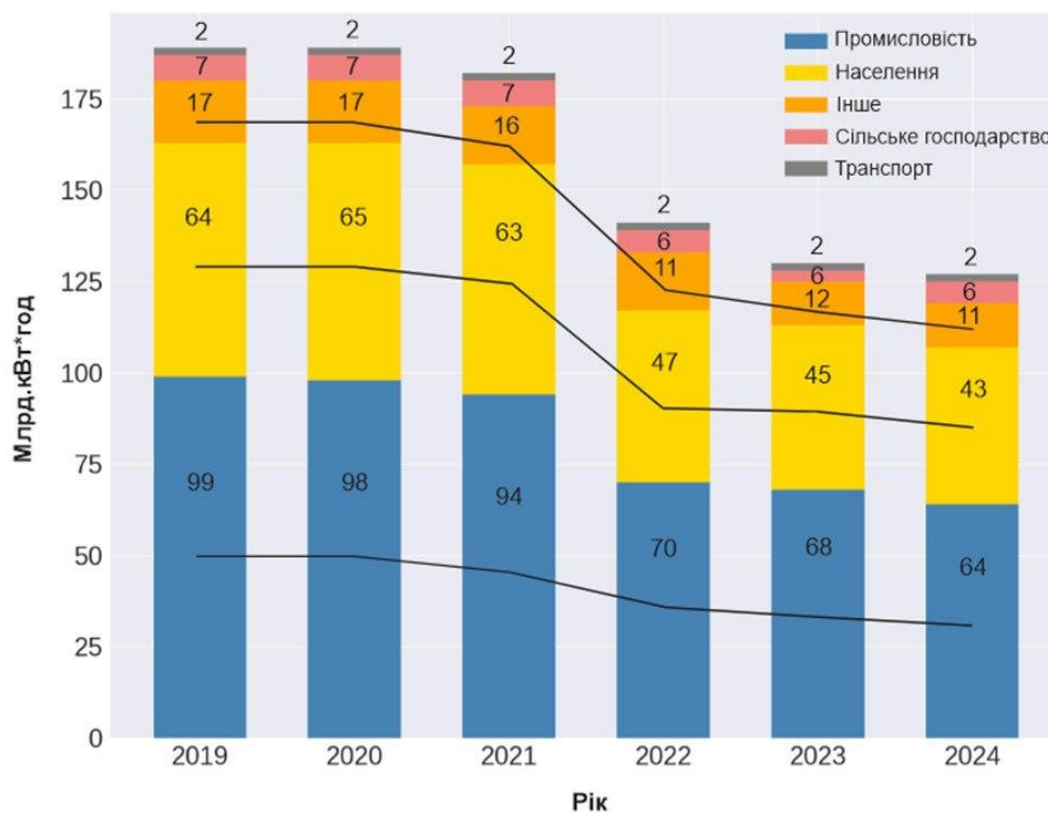


Рисунок Д.А.3 – Обсяги споживання електроенергії різними галузями в Україні за 2019-2024 роки

Постійним фактором в цьому процесі окрім зростання ціни за спожиту ЕЕ є і різниця в тарифах в залежності від годин доби. Своїм креативним зростанням характеризуються і тарифи на ЕЕ для промислових підприємств. (рис. Д.А.7). При цьому максимальні значення рівнів тарифів належать періодам доби між 18.00 - 23.00 годинами. Рівень відповідності пропозицій та попиту за аналізовану добу коливався в діапазоні від -2007,2 до +804,9 МВт·год., що до лютого місяця 2022 року не було характерним явищем, а було з точністю - до навпаки [17].

Це, поряд з рядом інших негараздів, в значній мірі доповнюється, фактом зменшення обсягів виробництва - видобутку ЗР на аналізованих видах підприємств (рис. Д.А.4, Д.А.5), що чітко віддзеркалилось на виробництві чавуну (рис. Д.А.5) - первинного етапу металовиробництва. З 2023 року відновились і тенденція зростання вартості залізної руди (рис. Д.А.6), хоча тут продовжується притаманна цьому показнику нестабільність та непрогнозованість ціноутворення. Свій неперспективний вклад в цей процес вносить і електроенергетична складова формування ціни, котра набула константного статусу в своєму зростанні [16-19].

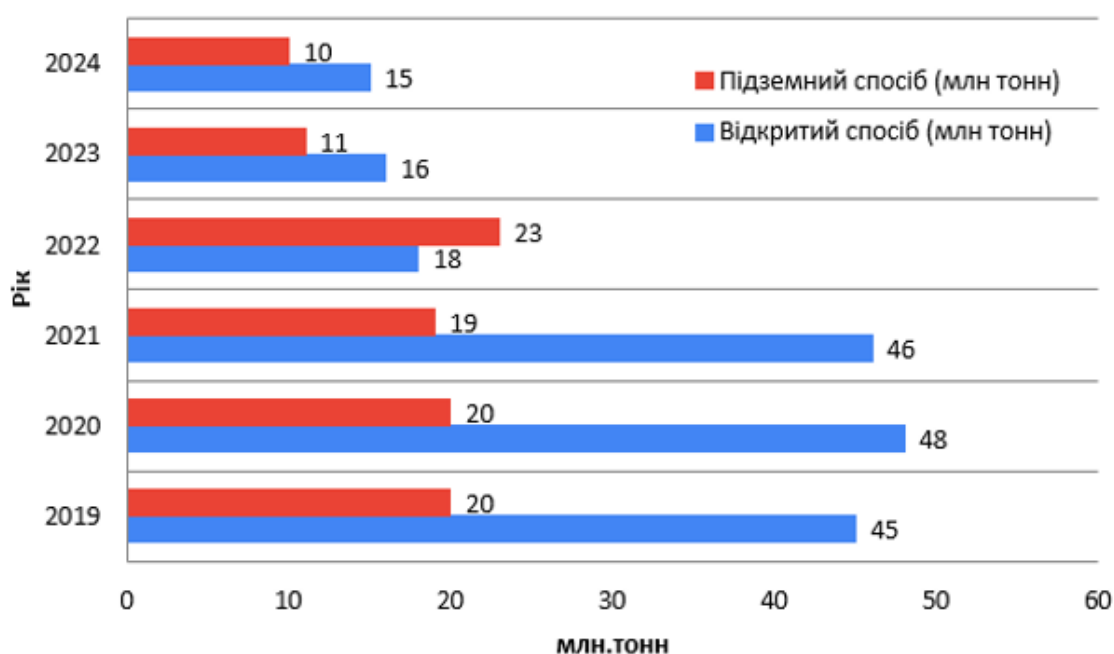


Рисунок Д.А.4 – Об'єми видобутку залізної руди в Україні за 2019-2024 роки

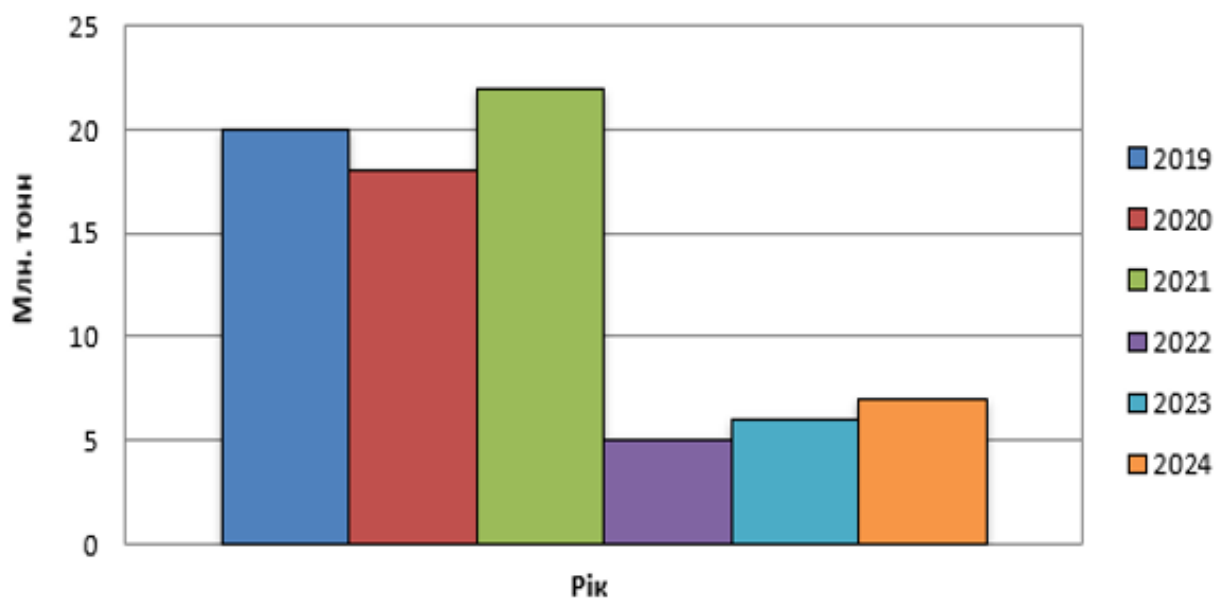


Рисунок Д.А.5 – Виробництво чавуну в Україні за 2019-2024 роки

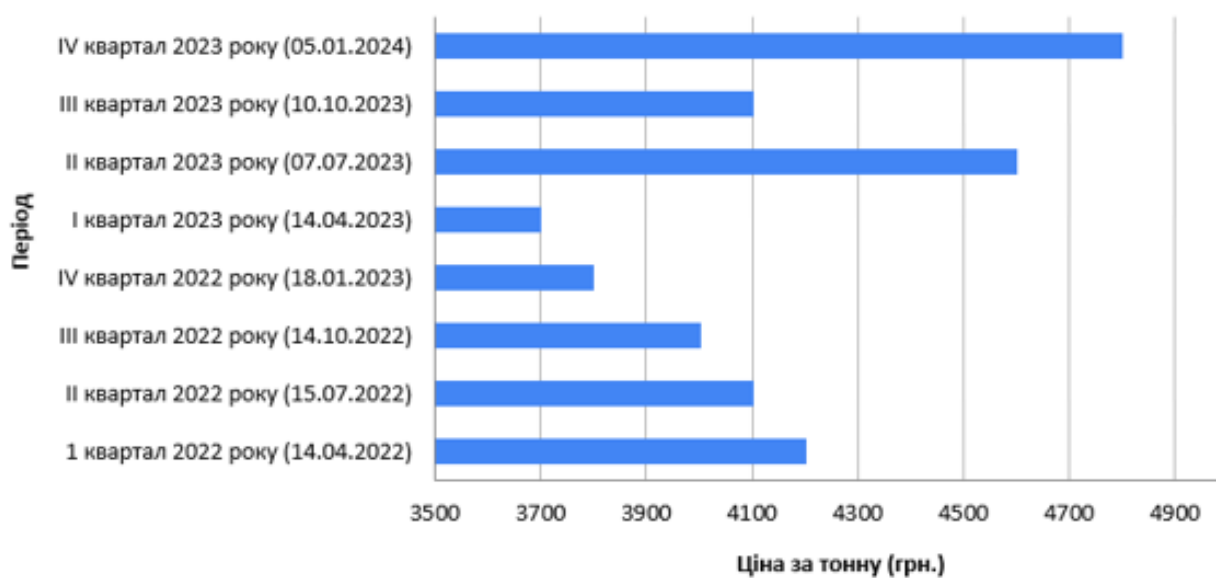


Рисунок Д.А.6 – Вартість видобуваної залізної руди за квартальні періоди 2022-2024 років

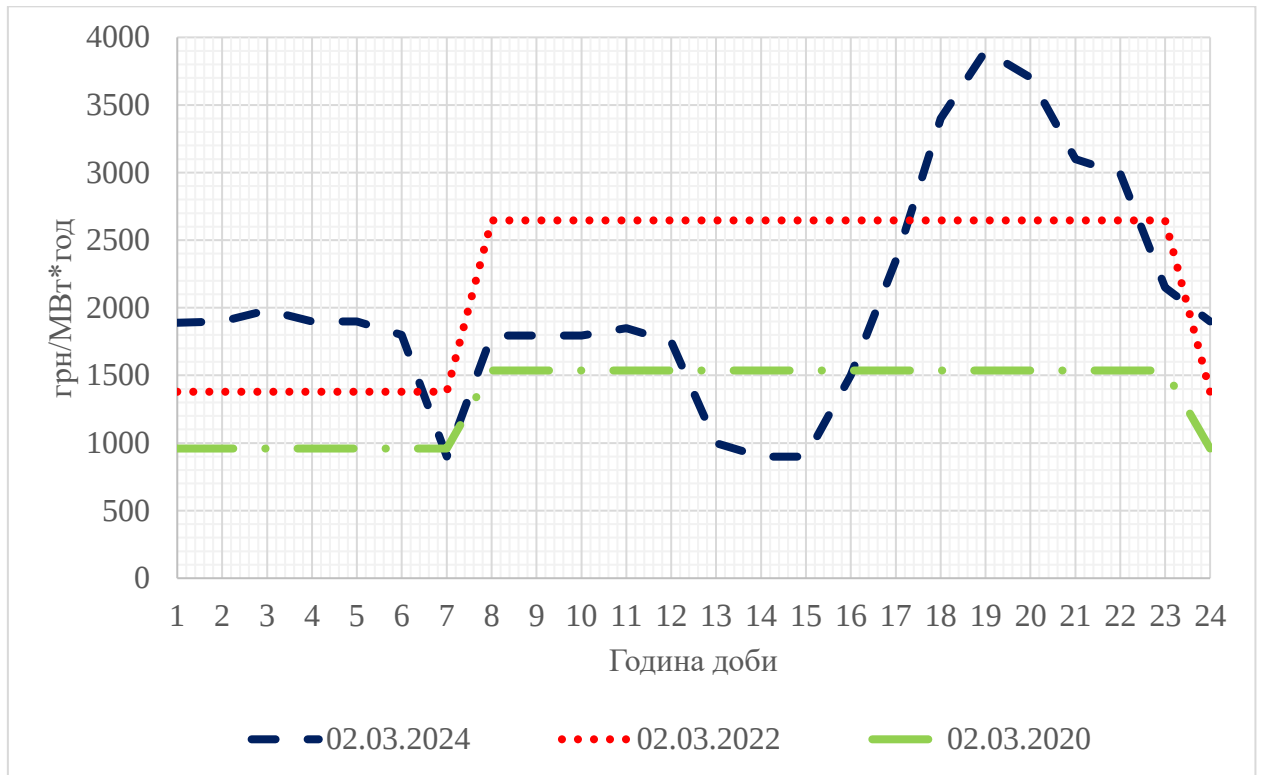


Рисунок Д.А.7 – Погодинні ціни купівлі-продажу електроенергії на ринку «на добу наперед»

Додаток Б

Узагальнена технологічна характеристика схем внутрішнього та зовнішнього електропостачання підземного рудника з видобутку залізної руди на правах шахти (№ 9) ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг»

Узагальнена характеристика схем внутрішнього та зовнішнього електропостачання шахти № 9 шахтоуправління ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг». Всі електроприймачі шахтоуправління (ШУ) відносяться до споживачів 1-ї категорії згідно класифікації ПУЕ. Електропостачання об'єктів ШУ здійснюється двома основними шляхами:

- від підстанції «Криворізька-330», шляхом відпайки від повітряних мереж 150 кВ Л-141 та Л-142 приєднанням до підстанції «Кірова-Східна» 150/35/6 кВ (повітряні лінії від відпайки до приєднання на підстанції мають довжину 620 м, кількість опор 5 одиниць);

- від мереж підстанції «Кірова-Східна» 150/35/6 кВ заживлено централі ЦПП горизонтів 475 м, 865 м, 1045 м, 1135 м, водовідливу гор. 475 м, 865 м (живлення кабельними лініями 6 кВ, кількість одиниць прокладені в землі по лоткам довжиною 650 м, до ствола «Кірова-Клітьова», далі ствольовими кабелями 6 кВ до горизонтів 1045 м, 1135 м, 865 м, 475 м; встановлена електрична сумарна потужність технологічного обладнання та обладнання водовідливу становить 13 675 МВт).

Далі, повітряною лінією 35 кВ довжиною 81 м, 2 опори, приєднане закритий розподільчий пристрій (ЗРП 35 кВ), з якого живляться:

- а) підстанція «Кірова-Північна» 35/6 кВ, приєднана двома повітряними лініями Л 383, Л 384 – лінії є власністю ДТЕК Дніпровські Електромережі. Основним споживачем для ШУ на даному приєднанні є головна вентиляторна установка ГВУ В-4 для провітрювання підземних гірничих виробок, встановлена потужність ГВУ В-4 – 4 МВт;

- б) підстанція «Глубинна» 35/6 кВ, приєднана двома повітряними лініями 35 кВ Л-31, Л-32 довжина 1880 м, кількість опор 13 од. Основним споживачем на даному приєднанні є споруди, підйомна машина, котельня шахти «Східна», встановлена потужність 3,1 МВт.

Від підстанції ЦРД 150/35/6 кВ, яка є власністю ДТЕК Дніпровські Електромережі приєднані наступні об'єкти ШУ:

а) компресорна станція централізованого повітря постачання КСЦП, шляхом двох повітряних ліній Л 389, Л 390 35 кВ довжина 180 м, кількість опор 2 од. При роботі одного компресора максимальна потужність 3,3 МВт;

б) поверхові та підземні споживачі ШУ: підстанції підйомних установок, дробильно-сортувальної фабрики, ремонтно-механічного цеху, складу ШУ, електроремонтного цеху, адміністративних та банного корпусів, ЦПП водовідливу горизонтів 475 м, 865 м, надшахтних будівель, котельня «Центральна». Дані об'єкти заживлено підземним способом кабельними лініями 6 кВ. Максимальна встановлена потужність існуючого обладнання 11,6 МВт.

Підземний комплекс технологічного обладнання (внутрішньо шахтний транспорт, видобуток, нарізна діляниця, діляниця буріння глибоких свердловин, діляниця підземного будівництва, діляниця електропостачання), діляниця головного водовідливу горизонтів 475 м, 865 м, 1045 м, 1135 м живиться кабельними лініями 6 кВ, які прокладені по вертикальним стволам шахти «Східна», шахти «Артем», шахти «Кірова-Клітьова» і далі по горизонтальним виробкам до підземних підстанцій. Кількість кабельних ліній 21 одиниця прокладених по стволам. Далі по підземним горизонтам кабельними ЛЕП ЕЕ трансформується до підземних підстанцій: ЦРП, ДПП.

Кількість поверхових підстанцій: 150/35/6 кВ – 1 одиниця;

35/6 кВ – 3 од.

Кількість підземних підстанцій: 6/0,4 кВ – 16 одиниць.

Дана схема електропостачання, до якої задіяно підключення від власних мереж та підстанцій, так і від мереж ДТЕК, забезпечує допустимий рівень надійності для безперервної роботи обладнання та безпеки людей.

Потужність силових трансформаторів підстанції «Кірова-Східна» – 2 одиниці по 40 МВт повністю забезпечує всі енергетичні потреби обладнання ШУ, яке існує на даний момент. Але, при необхідності відключення від підстанції ЦРП ДТЕК, та перепідключенні від підстанції «Кірова-Східна»,

буде необхідно виконати реконструкцію кабельних лотків та прокласти додаткові кабельні лінії 6 кВ.

Дозволена потужність ШУ, яка підтверджується піврічними добовими замірами, встановлена 15 МВт.

Параметри електричних кабелів внутрішніх ЛЕП рудника на правах шахти № 9 ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» наведено в табл. Д.Б.1.

Таблиця Д.Б.1 – Параметри електричних кабелів внутрішніх ЛЕП рудника на правах шахти № 9 ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг»

№ з/п	Найменування п/ст	Найменування вводу	Найменування кабеля	Кількість	Переріз, мм ²	Довжина, м	Добове споживання, кВт/год	Потужність, МВт
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	п/ст 154/35/6-п/ст 35/6 при ГВУ	Ввод №1	Провод АС	3	120	2500	60000	2,5
2	п/ст 154/35/6-п/ст 35/6 при ГВУ	Ввод №2	Провод АС	3	120	2500	60000	2,5
3	п/ст 154/35/6-п/ст 35/6 при КСЦВ	Ввод №1	Провод АС	3	120	200	70000	2,9
4	п/ст 154/35/6-п/ст 35/6 при КСЦВ	Ввод №2	Провод АС	3	120	200	70000	2,9
5	п/ст 154/35/6-ЗРУ-6 кВ при СПУ	Ввод №1	ЦСБнлШІНГ-10	3	3x150	550	15000	0,6
6	п/ст 154/35/6-ЗРУ-6 кВ при СПУ	Ввод №2	ЦСБнлШІНГ-10	3	3x150	550	22000	0,9
7	0-ЗРУ-6 кВ при водовідлив Г 475	Ввод №1	АВЗВКбшв-6	2	3x120+1x35	835	10550	0,44
8	0-ЗРУ-6 кВ при	Ввод №2	АВЕВКбшв-6	2	3x120+1x35	835	5000	0,2

	водовідлив Г 475							
9	0-ЗРУ-6 кВ при водовідлив Г 475	Ввод №3	ЦСПНУ-6	1	3x120	1250	0	0
10	0-ЗРУ-6 кВ при водовідлив Г 865	Ввод №1	АВЕВКбшв- 6	2	3x120+1x35	1565	7700	0,32
11	0-ЗРУ-6 кВ при водовідлив Г 865	Ввод №2	АВЕВКбшв- 6	2	3x120+1x35	1565	500	0,02
12	0-ЗРУ-6 кВ при водовідлив Г 865	Ввод №3	АВЕВКбшв- 6	1	3x120+1x35	1250	4205	0,175
13	0-ЗРУ-6 кВ при водовідлив Г 1135	Ввод №1	КШВЕПбшв- 6	2	3x95+1x10	2050	8098	0,337
14	0-ЗРУ-6 кВ при водовідлив Г 1135	Ввод №2	КШВЕПбшв- 6	2	3x95+1x10	2050	5861	0,244

Додаток В

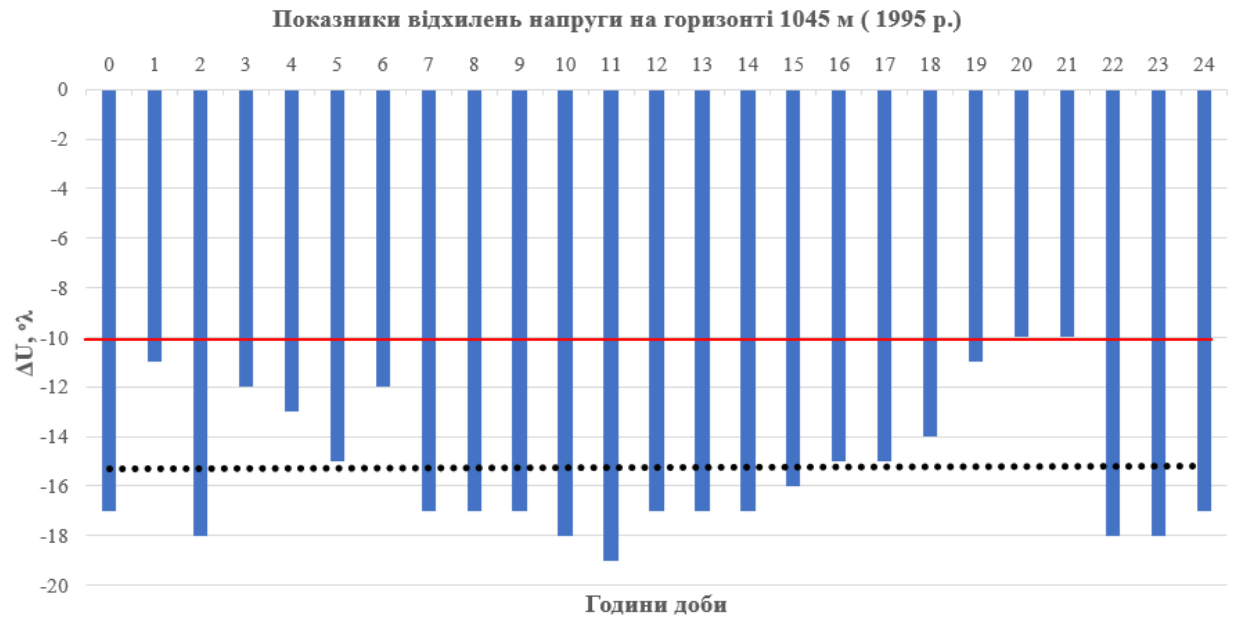
Погодинні в добі показники рівнів відхилень напруги живлення СЕП рудника

Погодинні в добі показники рівнів відхилень напруги живлення в системах рудника на правах шахти № 9 ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» наведені в табл. Д.В.1.

Таблиця Д.В.1 – Погодинні в добі показники рівнів відхилень напруги живлення в системах рудника на правах шахти № 9 ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг»

Години доби	Дата, підземн. горизонт рудн.	Дата, підземн. горизонт рудн.	Дата, підземн. горизонт рудн.	Дата, підземн. горизонт рудн.
	Грудень 2020	Грудень 2021	Грудень 2022	Грудень 2023
0	-17	-15	-18	-19
1	-11	-16	-19	-19
2	-18	-16	-16	-18
3	-12	-15	-17	-20
4	-13	-16	-17	-19
5	-15	-15	-19	-21
6	-12	-13	-18	-19
7	-16	-17	-17	-18
8	-17	-17	-18	-20
9	-18	-17	-18	-19
10	-17	-18	-19	-18
11	-18	-17	-20	-20
12	-19	-18	-19	-21
13	-17	-16	-19	-21
14	-17	-17	-18	-19
15	-16	-17	-17	-20
16	-15	-17	-16	-17-
17	-15	-16	-17	-18
18	-14	-1 6	-17	-20
19	-11	-12	-16	-20
20	-10	-11	-15	-21
21	-10	-11	-14	-19
22	-18	-17	-14	-18
23	-18	-20	-21	-21
24	-17	-21	-22	-22

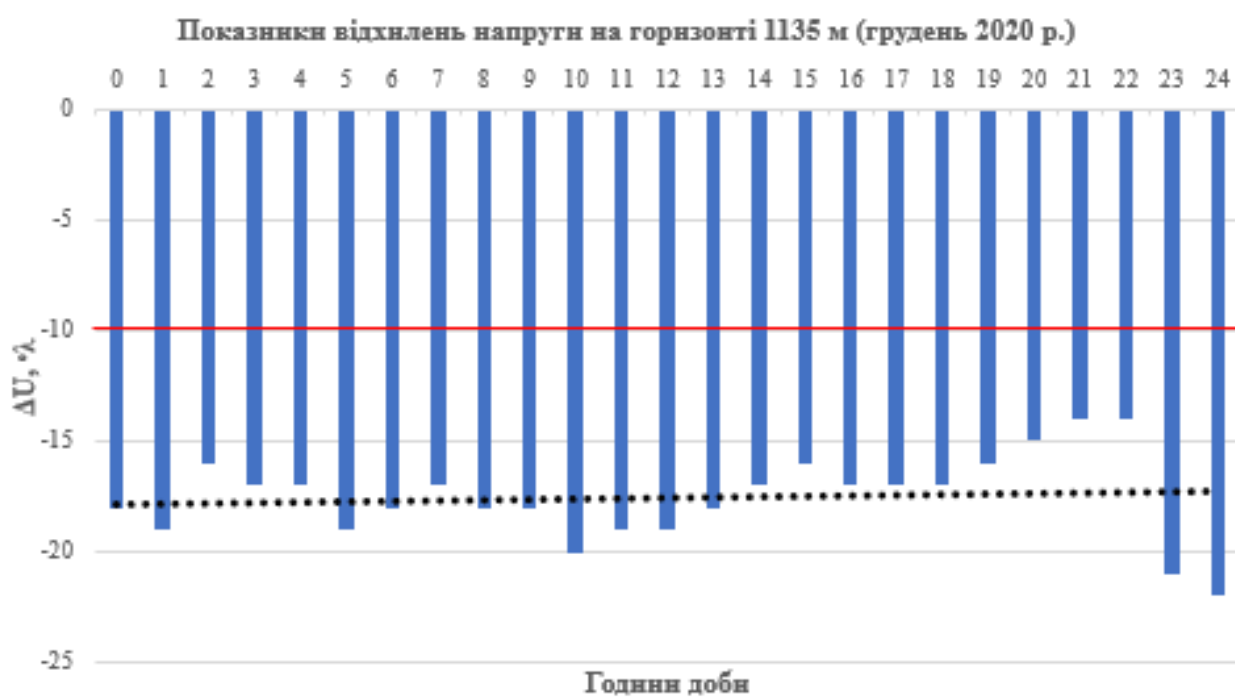
Отримані дані відповідають всім вимогам щодо формування динамічних рядів з метою побудови прогнозу. На рис. Д.В.1 візуалізовано дані, наведені в табл. Д.В.1.



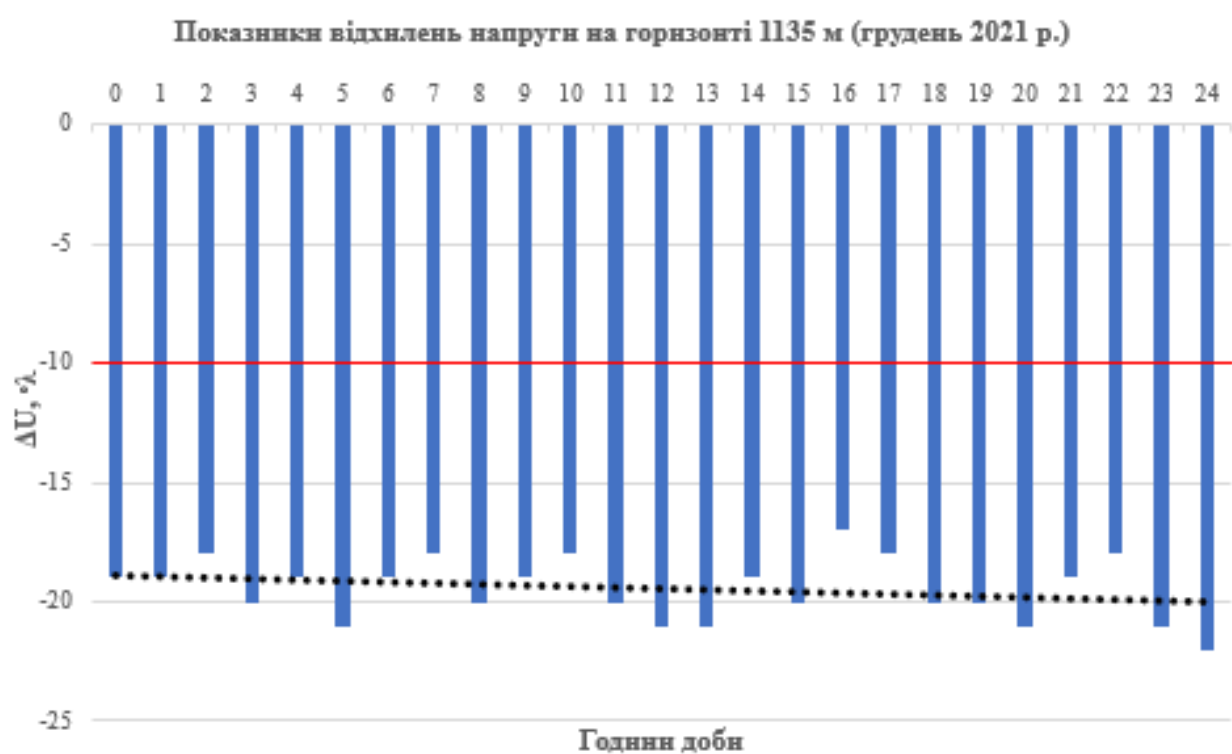
а)



б)



в)



г)

Рисунок Д.Б.1 – Відхилення рівнів напруги живлення від стандартних значень

Додаток Г

Вартісно-цільові дослідження якості електроенергії

Проведенні дослідження ПЯЕ з точки зору багатofакторної моделі (Розділ 3), дали підстави щодо можливості представлення інтегрованих параметричних частин які її складають.

Зокрема, багатofакторну математичну модель за ПЯЕ можна представити у мультиплікативній формі

$$Q = q_1^{c_1} \cdot q_2^{c_2} \cdot \dots \cdot q_I^{c_I},$$

або у згорнутому вигляді

$$Q = \prod_{i=1}^I q_i^{c_i}, \quad (\text{Д.Г.1})$$

де Q – загальна якість моделі,

q_i , $(i = 1, 2, \dots, I)$ – частинна якість,

c_i , $(i = 1, 2, \dots, I)$ – параметри,

I – кількість частинних якостей.

Математична модель (Д.Г.1) вважається заданою, якщо визначені параметри, які знаходяться методом ідентифікації.

При відомій математичній моделі (Д.Г.1) доцільно вирішити вартісно-цільове завдання щодо знаходження таких локальних ПЯЕ, які б мінімізували вартість впливу загальної якості електроенергії (Д.Г.1). Математично це можна записати у вимозі мінімізування лінійної комбінації вартостей частинних якостей

$$S = s_1 \cdot q_1 + s_2 \cdot q_2 + \dots + s_I \cdot q_I \rightarrow \min_{q_1, q_2, \dots, q_I},$$

або у згорнутому вигляді

$$S = \sum_{l=1}^I s_l \cdot q_l \rightarrow \min_{q_1, q_2, \dots, q_I}, \quad (\text{Д.Г.2})$$

де s_i – вартість частинної якості, при умові зберігання загальної якості (Д.Г.1).

Таким чином, задача оптимізації полягає в тому, щоб знайти мінімум функції (Д.Г.2) при умові зберігання величини загальної якості (Д.Г.1), тобто

$$S = \sum_{l=1}^I s_l \cdot q_l \rightarrow \min_{q_1, q_2, \dots, q_I},$$

$$Q = \prod_{i=1}^I q_i^{c_i} = \text{const.}$$

Для розв'язання цієї задачі застосуємо метод Лагранжа. Для цього буде утворена функція Лагранжа, користуючись формулами (Д.Г.1) і (Д.Г.2)

$$L(q_1, q_2, \dots, q_I, \lambda) = s_1 \cdot q_1 + s_2 \cdot q_2 + \dots + s_I \cdot q_I + \lambda \left(Q - q_1^{c_1} \cdot q_2^{c_2} \cdot \dots \cdot q_I^{c_I} \right), \quad (\text{Д.Г.3})$$

де λ – параметр.

Далі обчислимо частинні похідні від функції Лагранжа (Д.Г.3) по змінним, включаючи параметр λ , і згідно необхідній умові існування екстремума прирівнюємо їх нулю

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial q_1} &= s_1 - \lambda \cdot c_1 \cdot q_1^{c_1} \cdot q_2^{c_2} \cdot \dots \cdot q_I^{c_I} \cdot q_1^{-1} = 0, \\ \frac{\partial L}{\partial q_2} &= s_2 - \lambda \cdot c_2 \cdot q_1^{c_1} \cdot q_2^{c_2} \cdot \dots \cdot q_I^{c_I} \cdot q_2^{-1} = 0, \\ &\dots\dots\dots \\ \frac{\partial L}{\partial q_I} &= s_I - \lambda \cdot c_I \cdot q_1^{c_1} \cdot q_2^{c_2} \cdot \dots \cdot q_I^{c_I} \cdot q_I^{-1} = 0, \\ \frac{\partial L}{\partial \lambda} &= Q - q_1^{c_1} \cdot q_2^{c_2} \cdot \dots \cdot q_I^{c_I} = 0 \end{aligned} \tag{Д.Г.4}$$

В результаті отримуємо систему $I + 1$ рівнянь з $I + 1$ невідомими (Д.Г.4) яку представимо у вигляді

$$\left\{ \begin{array}{l} s_1 = \lambda \cdot c_1 \cdot q_1^{c_1} \cdot q_2^{c_2} \cdot \dots \cdot q_I^{c_I} \cdot q_1^{-1} \\ s_2 = \lambda \cdot c_2 \cdot q_1^{c_1} \cdot q_2^{c_2} \cdot \dots \cdot q_I^{c_I} \cdot q_2^{-1} \\ \\ s_I = \lambda \cdot c_I \cdot q_1^{c_1} \cdot q_2^{c_2} \cdot \dots \cdot q_I^{c_I} \cdot q_I^{-1} \\ Q = q_1^{c_1} \cdot q_2^{c_2} \cdot \dots \cdot q_I^{c_I} \end{array} \right. \quad (\text{Д.Г.5})$$

Система рівнянь (Д.Г.5) є нелінійною, тому для її розв’язання скористаємось штучним методом. Для цього будемо ділити усі рівняння, крім останнього, на перше рівняння

$$\frac{s_2}{s_1} = \frac{c_2}{c_1} \frac{q_1}{q_2},$$

$$\frac{s_3}{s_1} = \frac{c_3}{c_1} \frac{q_1}{q_3}, \quad (\text{Д.Г.6})$$

.....

$$\frac{s_I}{s_1} = \frac{c_I}{c_1} \frac{q_1}{q_I}.$$

Далі розв'язуємо кожне із рівнянь системи (Д.Г.6) відносно невідомої змінної q_1

$$\begin{aligned} q_2 &= \frac{c_2}{c_1} \frac{s_1}{s_2} q_1, \\ q_3 &= \frac{c_3}{c_1} \frac{s_1}{s_3} q_1, \end{aligned} \quad (\text{Д.Г.7})$$

.....

$$q_I = \frac{c_I}{c_1} \frac{s_1}{s_I} q_1.$$

Підставимо змінні із системи (Д.Г.7) в останнє рівняння системи (Д.Г.5)

$$Q = q_1^{c_1} \cdot \left(\frac{c_2}{c_1} \frac{s_1}{s_2} q_1 \right)^{c_2} \cdot \left(\frac{c_3}{c_1} \frac{s_1}{s_3} q_1 \right)^{c_3} \cdot \dots \cdot \left(\frac{c_I}{c_1} \frac{s_1}{s_I} q_1 \right)^{c_I}. \quad (\text{Д.Г.8})$$

Рівняння (Д.Г.8) є рівнянням $c_1 + c_2 + \dots + c_I$ ступеня невідомої q_1 .
Дійсно,

$$Q = q_1^{c_1+c_2+c_3+\dots+c_I} \cdot \left(\frac{c_2}{c_1} \frac{s_1}{s_2} \right)^{c_2} \cdot \left(\frac{c_3}{c_1} \frac{s_1}{s_3} \right)^{c_3} \cdot \dots \cdot \left(\frac{c_I}{c_1} \frac{s_1}{s_I} \right)^{c_I}. \quad (\text{Д.Г.9})$$

Розв'язуємо рівняння (Д.Г.9) відносно невідомої q_1

$$Q = q_1^{c_1+c_2+c_3+\dots+c_I} \cdot \left(\frac{s_1}{c_1} \right)^{c_2+c_3+\dots+c_I} \cdot \left(\frac{c_2}{s_2} \right)^{c_2} \cdot \left(\frac{c_3}{s_3} \right)^{c_3} \cdot \dots \cdot \left(\frac{c_I}{s_I} \right)^{c_I},$$

$$Q^{\frac{1}{c_1+c_2+c_3+\dots+c_I}} = q_1 \cdot \left[\left(\frac{s_1}{c_1} \right)^{c_2+c_3+\dots+c_I} \cdot \left(\frac{c_2}{s_2} \right)^{c_2} \cdot \left(\frac{c_3}{s_3} \right)^{c_3} \cdot \dots \cdot \left(\frac{c_I}{s_I} \right)^{c_I} \right]^{\frac{1}{c_1+c_2+c_3+\dots+c_I}},$$

$$q_1 = Q^{\frac{1}{c_1+c_2+c_3+\dots+c_I}} \cdot \left[\left(\frac{s_1}{c_1} \right)^{c_2+c_3+\dots+c_I} \cdot \left(\frac{c_2}{s_2} \right)^{c_2} \cdot \left(\frac{c_3}{s_3} \right)^{c_3} \cdot \dots \cdot \left(\frac{c_I}{s_I} \right)^{c_I} \right]^{\frac{-1}{c_1+c_2+c_3+\dots+c_I}},$$

$$q_1 = \left[Q^{-1} \cdot \left(\frac{s_1}{c_1} \right)^{c_2+c_3+\dots+c_I} \cdot \left(\frac{c_2}{s_2} \right)^{c_2} \cdot \left(\frac{c_3}{s_3} \right)^{c_3} \cdot \dots \cdot \left(\frac{c_I}{s_I} \right)^{c_I} \right]^{\frac{-1}{c_1+c_2+c_3+\dots+c_I}}. \quad (\text{Д.Г.10})$$

В згорнутому вигляді формула (Д.Г.10) запишеться у вигляді

$$q_{1,opt} = \left[Q^{-1} \cdot \left(\frac{s_1}{c_1} \right)^{\sum_{i=2}^I c_i} \cdot \prod_{k=2}^I \left(\frac{c_k}{s_k} \right)^{c_k} \right]^{\frac{-1}{\sum_{i=1}^I c_i}}. \quad (\text{Д.Г.11})$$

Враховуючи (Д.Г.11), формули (Д.Г.7) дозволяють записати значення інших невідомих змінних

$$q_{2,opt} = \frac{c_2}{c_1} \frac{s_1}{s_2} \left[Q^{-1} \cdot \left(\frac{s_1}{c_1} \right)^{\sum_{i=2}^I c_i} \cdot \prod_{k=2}^I \left(\frac{c_k}{s_k} \right)^{c_k} \right]^{\frac{-1}{\sum_{i=1}^I c_i}},$$

$$q_{3,opt} = \frac{c_3}{c_1} \frac{s_1}{s_3} \left[Q^{-1} \cdot \left(\frac{s_1}{c_1} \right)^{\sum_{i=2}^I c_i} \cdot \prod_{k=2}^I \left(\frac{c_k}{s_k} \right)^{c_k} \right]^{\frac{-1}{\sum_{i=1}^I c_i}}, \quad (\text{Д.Г.12})$$

.....

$$q_{I,opt} = \frac{c_I}{c_1} \frac{s_1}{s_I} \left[Q^{-1} \cdot \left(\frac{s_1}{c_1} \right)^{\sum_{i=2}^I c_i} \cdot \prod_{k=2}^I \left(\frac{c_k}{s_k} \right)^{c_k} \right]^{\frac{-1}{\sum_{i=1}^I c_i}}.$$

В загальному вигляді формули (Д.Г.11), (Д.Г.12) мають вигляд

$$q_{k,opt} = \frac{c_k}{c_1} \frac{s_1}{s_k} \left[Q^{-1} \cdot \left(\frac{s_1}{c_1} \right)^{\sum_{i=2}^I c_i} \cdot \prod_{l=2}^I \left(\frac{c_l}{s_l} \right)^{c_l} \right]^{\frac{-1}{\sum_{i=1}^I c_i}} \quad (k=1,2,\dots,I) \quad (\text{Д.Г.13})$$

Згідно (Д.Г.13) мінімальна вартість загальної якості електроенергії запишеться у вигляді

$$S_{\min} = \sum_{k=1}^I s_k \cdot q_{k,opt},$$

$$S_{\min} = \frac{s_1}{c_1} \frac{Q^{\frac{1}{\sum_{i=1}^I c_i}} \sum_{k=1}^I c_k}{\left(\frac{s_1}{c_1} \right)^{\frac{1}{\sum_{i=1}^I c_i}} \cdot \prod_{l=2}^I \left(\frac{c_l}{s_l} \right)^{\frac{c_l}{\sum_{i=1}^I c_i}}} . \quad (\text{Д.Г.14})$$

Як приклад розглянемо оптимізацію двохфакторної моделі за якістю електроенергії. В даному випадку двохфакторна модель за якістю електроенергії має вигляд

$$Q = q_1^{c_1} q_2^{c_2}, \quad (\text{Д.Г.15})$$

де Q – якість електроенергії,

q_1, q_2 – частинні якості електроенергії,

c_1, c_2 – параметри.

Величини параметрів, які входять в формулу (Д.Г.15), знаходяться шляхом ідентифікації згідно заданого статистичного матеріалу. В табл. Д.Г.1 приведений відповідний статистичний матеріал.

Для того, щоб скористатися методом найменших квадратів в лінійній формі для знаходження параметрів в моделі (Д.Г.15) застосуємо операцію логарифмування

$$\ln Q = c_1 \ln q_1 + c_2 \ln q_2,$$

або

$$y = c_1 x_1 + c_2 x_2, \quad (\text{Д.Г.16})$$

де $y = \ln Q$, $x_1 = \ln q_1$, $x_2 = \ln q_2$.

Таблиця Д.Г.1 – Величини параметрів (Д.Г.15)

№	Q	q_1	q_2	$y = \ln Q$	$x_1 = \ln q_1$	$x_2 = \ln q_2$	Q_m	S
---	-----	-------	-------	-------------	-----------------	-----------------	-------	-----

1	0.9	0.95	0.96	-0.10536	-0.05129	-0.04082	0.93	1.238
2	0.89	0.92	0.93	-0.11653	-0.08338	-0.07257	0.88	1.199
3	0.85	0.91	0.93	-0.16252	-0.09431	-0.07257	0.87	1.189
4	0.88	0.93	0.94	-0.12783	-0.07257	-0.06188	0.89	1.212
5	0.84	0.91	0.89	-0.17435	-0.09431	-0.11653	0.84	1.177
6	0.85	0.92	0.9	-0.16252	-0.08338	-0.10536	0.86	1.19
7	0.83	0.9	0.89	-0.18633	-0.10536	-0.11653	0.83	1.167
8	0.87	0.89	0.89	-0.13926	-0.11653	-0.11653	0.83	1.157
9	0.91	0.96	0.92	-0.09431	-0.04082	-0.08338	0.91	1.236
10	0.93	0.98	0.95	-0.07257	-0.0202	-0.05129	0.95	1.265

Для знаходження величин параметрів в формулі (Д.Г.16) скористаємось підпрограмою «Регресія» в програмі *Microsoft Excel* згідно даних табл. Д.Г.1.

В результаті получимо рівняння регресії

$$y = 0,9378 \cdot x_1 + 0,6998 \cdot x_2 \quad (\text{Д.Г.17})$$

При цьому коефіцієнт детермінації склав величину

$$R^2 = 0,974. \quad (\text{Д.Г.18})$$

В свою чергу коефіцієнт множинної кореляції становить

$$R = 0,987. \quad (\text{Д.Г.19})$$

Оскільки згідно (3.171) виконується умова

$$0,9 \leq 0,987 \leq 1,$$

то по шкалі Чеддока має місце «вельми високий» зв'язок між змінними.

В реальних значеннях згідно (Д.Г.19) двофакторна модель за якістю електроенергії має вигляд

$$Q_m = q_1^{0,9378} \cdot q_2^{0,6998}. \quad (\text{Д.Г.20})$$

На рис. Д.Г.1 представлені графіки реальних коливань значень і двофакторної моделі за якістю електроенергії.

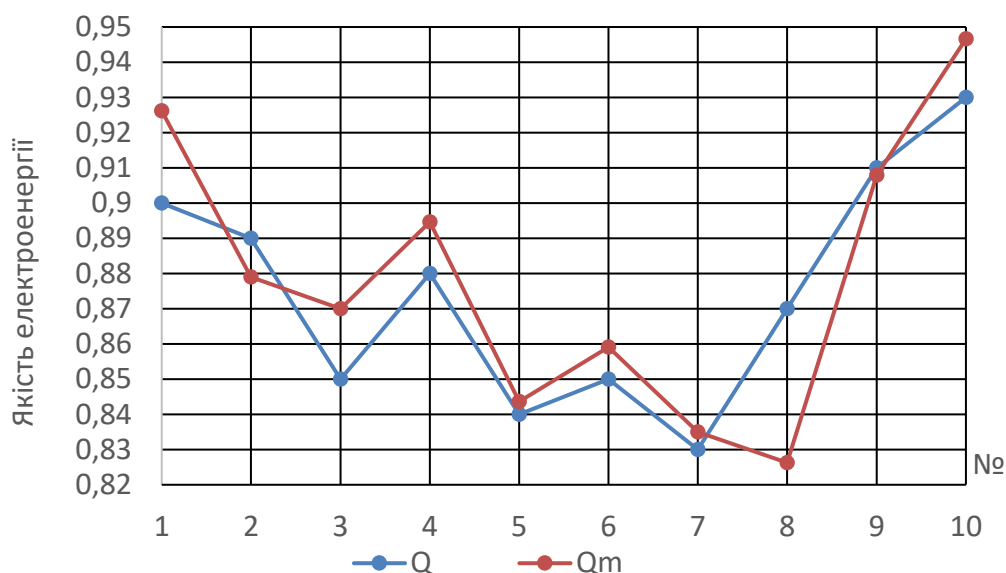


Рисунок Д.Г.1 – Зміна якості електроенергії у парадигмі двофакторної моделі

Аналіз приведених графіків підтверджує збіжність реальних значень якості електроенергії і значень, обчислених по двофакторній моделі за якістю електроенергії.

Функція, яка визначає вартість загальної якості електроенергії відносно вартостей частинних якостей електроенергії, має вигляд

$$S = s_1 q_1 + s_2 q_2, \quad (\text{Д.Г.21})$$

де S – вартість загальної якості електроенергії,

s_1, s_2 – питомі вартості частинних якостей електроенергії.

Задача оптимізації двофакторної моделі за якістю електроенергії полягає в мінімізації вартості загальної якості електроенергії при умові заданої величини загальної якості електроенергії (Д.Г.15), тобто

$$S = s_1 q_1 + s_2 q_2 \rightarrow \min_{q_1, q_2},$$

$$Q = q_1^{c_1} q_2^{c_2} = \text{const.}$$

Користуючись другою умовою, знаходимо величину другої частинної якості електроенергії

$$q_2 = \left(\frac{Q}{q_1^{c_1}} \right)^{\frac{1}{c_2}}. \quad (\text{Д.Г.22})$$

Тоді загальна якість електроенергії визначиться як функція однією змінною, а саме, першої частинної якості електроенергії

$$S = s_1 q_1 + s_2 \left(\frac{Q}{q_1^{c_1}} \right)^{\frac{1}{c_2}},$$

або

$$S(q_1) = s_1 q_1 + s_2 Q^{\frac{1}{c_2}} q_1^{-\frac{c_1}{c_2}}. \quad (\text{Д.Г.23})$$

Доцільно дослідити залежність загальної якості електроенергії (Д.Г.23) від величини частинної якості електроенергії q_1 при заданих величинах параметрів. Величини параметрів c_1 і c_2 визначаються результатами ідентифікації математичної моделі (Д.Г.1), тобто

$$c_1 = 0,9378, \quad c_2 = 0,6998. \quad (\text{Д.Г.24})$$

В свою чергу, приймемо умовно

$$Q = 0,321, \quad s_1 = 1, \quad s_2 = 0,3. \quad (\text{Д.Г.25})$$

Тоді, згідно (Д.Г.23) і (Д.Г.24), формула (Д.Г.25) прийме вигляд

$$S(q_1) = q_1 + 0,089 q_1^{-1,34}. \quad (\text{Д.Г.26})$$

На рис. Д.Г.2 представлено графік функції (Д.Г.26).

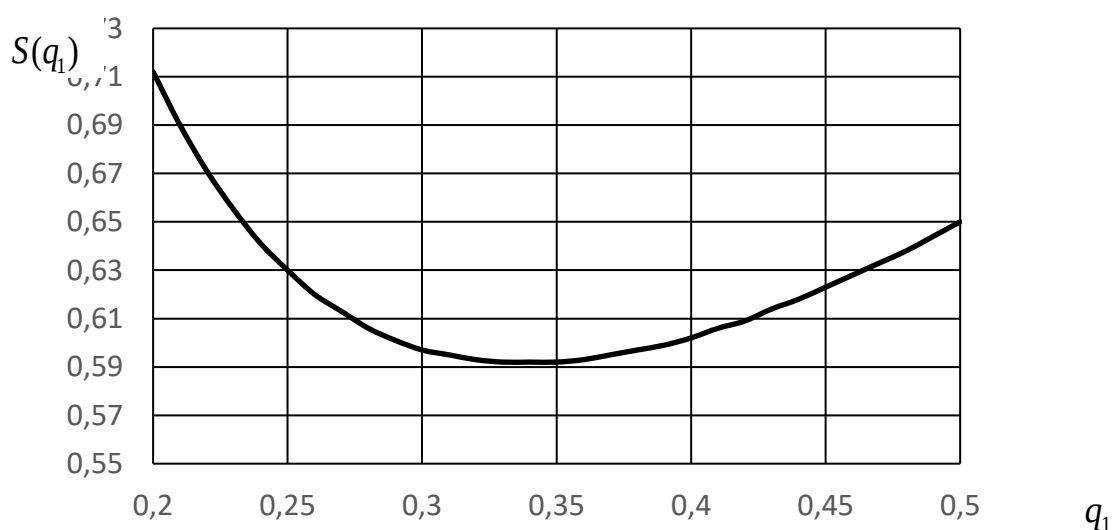


Рисунок Д.Г.2 – Залежність загальної вартості якості електроенергії від величини її частинних (дольових) значень

Аналіз графіка, приведеного на рис. Д.Г.2, показує, що залежність вартості загальної якості електроенергії при вибраних параметрах від величини частинної якості електроенергії досягає мінімальної величини при деякому оптимальному значенні цього параметру. Аналітично знаходимо, що

$$q_{1,opt} = 0,339, \quad S_{\min} = S(q_{1,opt}) = 0,591. \quad (\text{Д.Г.27})$$

Розв'яжемо задачу про знаходження мінімальної величини вартості загальної якості електроенергії аналітично.

Для знаходження мінімальної вартості загальної якості електроенергії (Д.Г.23) скористаємось необхідною умовою існування екстремуму функції однієї змінної. Згідно цієї умови необхідно, щоб в точці екстремуму похідна функції дорівнювала нулю. Знаходимо похідну функції (Д.Г.21)

$$\frac{dS}{dq_1} = s_1 + s_2 Q^{\frac{1}{c_2}} \left(-\frac{c_1}{c_2} \right) q_1^{\frac{-c_1}{c_2}-1}. \quad (\text{Д.Г.28})$$

Прирівнюємо нулю похідну функцію (Д.Г.27) і розв'язуємо здобуте рівняння відносно q_1

$$\begin{aligned} s_1 + s_2 Q^{\frac{1}{c_2}} \left(-\frac{c_1}{c_2} \right) q_1^{\frac{-c_1}{c_2}-1} &= 0, \\ s_1 &= s_2 \frac{c_1}{c_2} Q^{\frac{1}{c_2}} q_1^{\frac{-c_1}{c_2}-1}, \\ s_1 &= s_2 \frac{c_1}{c_2} Q^{\frac{1}{c_2}} q_1^{\frac{-c_1+c_2}{c_2}}, \\ q_1^{\frac{c_1+c_2}{c_2}} &= \frac{s_2}{s_1} \frac{c_1}{c_2} Q^{\frac{1}{c_2}}, \\ q_1 &= \left(\frac{s_2}{s_1} \frac{c_1}{c_2} Q^{\frac{1}{c_2}} \right)^{\frac{c_2}{c_1+c_2}}. \end{aligned} \quad (\text{Д.Г.29})$$

Для визначення характеру знайденої критичної точки (Д.Г.29), скористаємось похідною другого порядку. Для цього знайдемо похідну від похідної (Д.Г.29)

$$\frac{d^2 S}{dq_1^2} = s_2 Q^{\frac{1}{c_2}} \left(-\frac{c_1}{c_2} \right) \left(-\frac{c_1}{c_2} - 1 \right) q_1^{-\frac{c_1}{c_2} - 2}. \quad (\text{Д.Г.30})$$

Підставляємо в (Д.Г.30) значення критичної точки (Д.Г.29)

$$\begin{aligned} \frac{d^2}{dq_1^2} S \left[q_1 = \left(\frac{s_2}{s_1} \frac{c_1}{c_2} Q^{\frac{1}{c_2}} \right)^{\frac{c_2}{c_1+c_2}} \right] &= s_2 Q^{\frac{1}{c_2}} \left(-\frac{c_1}{c_2} \right) \left(-\frac{c_1}{c_2} - 1 \right) \left(\left(\frac{s_2}{s_1} \frac{c_1}{c_2} Q^{\frac{1}{c_2}} \right)^{\frac{c_2}{c_1+c_2}} \right)^{-\frac{c_1}{c_2} - 2}, \\ \frac{d^2}{dq_1^2} S \left[q_1 = \left(\frac{s_2}{s_1} \frac{c_1}{c_2} Q^{\frac{1}{c_2}} \right)^{\frac{c_2}{c_1+c_2}} \right] &= s_2 Q^{\frac{1}{c_2}} \left(\frac{c_1}{c_2} \right) \left(\frac{c_1}{c_2} + 1 \right) \left(\left(\frac{s_2}{s_1} \frac{c_1}{c_2} Q^{\frac{1}{c_2}} \right)^{\frac{c_2}{c_1+c_2}} \right)^{-\frac{c_1}{c_2} - 2} > 0 \end{aligned} \quad (\text{Д.Г.31})$$

Оскільки значення похідної другого порядку в критичній точці додатне, то функція (Д.Г.26) в цій точці має мінімум. Таким чином, має місце

$$q_{1,opt} = \left(\frac{s_2}{s_1} \frac{c_1}{c_2} Q^{\frac{1}{c_2}} \right)^{\frac{c_2}{c_1+c_2}}. \quad (\text{Д.Г.32})$$

Користуючись формулою (Д.Г.25), знаходимо оптимальне значення другої частинної якості електроенергії

$$\begin{aligned} q_{2,opt} &= Q^{\frac{1}{c_2}} q_{1,opt}^{-\frac{c_1}{c_2}}, \\ q_{2,opt} &= Q^{\frac{1}{c_2}} \left[\left(\frac{s_2}{s_1} \frac{c_1}{c_2} Q^{\frac{1}{c_2}} \right)^{\frac{c_2}{c_1+c_2}} \right]^{-\frac{c_1}{c_2}}, \\ q_{2,opt} &= Q^{\frac{1}{c_2}} \left(\frac{s_2}{s_1} \frac{c_1}{c_2} Q^{\frac{1}{c_2}} \right)^{-\frac{c_1}{c_1+c_2}}. \end{aligned} \quad (\text{Д.Г.33})$$

Користуючись (Д.Г.32) і (Д.Г.33), знаходимо мінімальну величину вартості загальної якості електроенергії

$$S_{\min} = s_1 \left(\frac{s_2}{s_1} \frac{c_1}{c_2} Q^{\frac{1}{c_2}} \right)^{\frac{c_2}{c_1+c_2}} + s_2 Q^{\frac{1}{c_2}} \left(\frac{s_2}{s_1} \frac{c_1}{c_2} Q^{\frac{1}{c_2}} \right)^{-\frac{c_1}{c_1+c_2}}. \quad (\text{Д.Г.34})$$

Для перевірки здобутих результатів (Д.Г.32), (Д.Г.33) і (Д.Г.34) підставляємо в них значення параметрів (Д.Г.24) і (Д.Г.25)

$$q_{1,opt} = \left(\frac{0,3}{1} \cdot \frac{0,9378}{0,6998} \cdot 0,321^{\frac{1}{0,6998}} \right)^{\frac{0,6998}{0,9378+0,6998}} = 0,3385, \quad (\text{Д.Г.35})$$

$$q_{2,opt} = 0,321^{\frac{1}{0,6998}} \left(\frac{0,3}{1} \cdot \frac{0,9378}{0,6998} \cdot 0,321^{\frac{1}{0,6998}} \right)^{\frac{0,9378}{0,9378+0,6998}} = 0,8419, \quad (\text{Д.Г.36})$$

$$S_{\min} = S(q_{1,opt}, q_{2,opt}) = 1 \cdot 0,3385 + 0,3 \cdot 0,8419 = 0,5911. \quad (\text{Д.Г.37})$$

Результати (Д.Г.35) і (Д.Г.36) співпадають з (Д.Г.37), що підтверджує правильність обчислень.

В останньому стовпці табл. Д.Г.2 приведені результати розрахунків величин вартості загальної якості електроенергії по формулі (Д.Г.21). Мінімальна величина із розрахованих становить

$$S = 1,157. \quad (\text{Д.Г.38})$$

Таким чином, порівняння обчислених вартостей загальної якості електроенергії, згідно формул (Д.Г.35) і (Д.Г.36), вказує на те, що шляхом мінімізації вартість загальної якості електроенергії зменшилась в

$$\frac{S}{S_{\min}} = \frac{1,157}{0,5911} = 1,957 \approx 2 \text{ рази.} \quad (\text{Д.Г.39})$$

Треба підкреслити, що частинні якості електроенергії повинні знаходитися в межах відрізка $[0,1]$, тобто задовольняти обмеженню

$$0 \leq q_i \leq 1. \quad (\text{Д.Г.40})$$

Таким чином, згідно (Д.Г.32) повинно виконуватися

$$q_{1,opt} = \left(\frac{s_2}{s_1} \frac{c_1}{c_2} Q^{\frac{1}{c_2}} \right)^{\frac{c_2}{c_1+c_2}} \leq 1. \quad (\text{Д.Г.41})$$

Умова (Д.Г.41) накладає обмеженість на відношення питомих вартостей. Дійсно, для першої частинної якості $q_{1,opt}$ має місце

$$\begin{aligned}
& \left(\frac{s_2}{s_1} \frac{c_1}{c_2} Q^{\frac{1}{c_2}} \right)^{\frac{c_2}{c_1+c_2}} \leq 1, \\
& \frac{s_2}{s_1} \frac{c_1}{c_2} Q^{\frac{1}{c_2}} \leq 1, \\
& \frac{s_2}{s_1} \leq \frac{c_2}{c_1} Q^{-\frac{1}{c_2}}.
\end{aligned} \tag{Д.Г.42}$$

Аналогічно, для другої частинної якості $q_{2,opt}$

$$q_{2,opt} = Q^{\frac{1}{c_2}} \left(\frac{s_2}{s_1} \frac{c_1}{c_2} Q^{\frac{1}{c_2}} \right)^{-\frac{c_1}{c_1+c_2}} \leq 1,$$

$$\left(\frac{s_2}{s_1} \frac{c_1}{c_2} Q^{\frac{1}{c_2}} \right)^{-\frac{c_1}{c_1+c_2}} \leq Q^{\frac{-1}{c_2}},$$

$$\frac{s_2}{s_1} \frac{c_1}{c_2} Q^{\frac{1}{c_2}} \leq Q^{\frac{1}{c_2} \frac{c_1}{c_1+c_2}},$$

$$\frac{s_2}{s_1} \frac{c_1}{c_2} \leq Q^{\frac{1}{c_2} \frac{c_1}{c_1+c_2}} \cdot Q^{\frac{-1}{c_2}},$$

$$\frac{s_2}{s_1} \frac{c_1}{c_2} \leq Q^{\frac{1}{c_2} \frac{c_1}{c_1+c_2} + \frac{-1}{c_2}},$$

$$\frac{s_2}{s_1} \frac{c_1}{c_2} \leq Q^{\frac{1}{c_2} \left(\frac{c_1}{c_1+c_2} - 1 \right)},$$

$$\frac{s_2}{s_1} \frac{c_1}{c_2} \leq Q^{\frac{1}{c_2} \left(\frac{c_1 - c_1 - c_2}{c_1+c_2} \right)},$$

$$\frac{s_2}{s_1} \frac{c_1}{c_2} \leq Q^{\frac{-1}{c_1+c_2}},$$

$$\frac{s_2}{s_1} \leq \frac{c_2}{c_1} Q^{\frac{-1}{c_1+c_2}}. \tag{Д.Г.43}$$

Як показали результати проведених розрахунків (Д.Г.35) і (Д.Г.36) умови (Д.Г.42) і (Д.Г.43) виконуються. Дійсно, має місце

$$\frac{s_2}{s_1} = \frac{0,3}{1} = 0,3, \quad \frac{c_2}{c_1} Q^{\frac{-1}{c_2}} = 3,778, \quad \frac{c_2}{c_1} Q^{\frac{-1}{c_1+c_2}} = 1,492,$$

що підтверджує виконання умов (Д.Г.42) і (Д.Г.43).

Зрозуміло, якщо б умови (Д.Г.42) або (Д.Г.43) не виконувались, треба б було поміняти відношення питомих вартостей.

Таким чином, проведений комплекс наукових досліджень дає підстави стверджувати про доцільність опрацювання набутих наукових здобутків в подальшому процесі пошуку та розробки логістики і схемотехнічних рішень, щодо управлінських дій з підтримання діючих показників якості ЕЕ на рівні відповідних стандартів [67].

Додаток Д

Акти, довідки про впровадження результатів дисертаційного дослідження

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Перший проректор
Криворізького національного університету
к.т.н., доц. Владислав ЧУБАРОВ


«__» _____ 2025

АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи КОТЯКОВОЇ Марини Генадіївни
«Оперативне керування напругою живлення споживачів електричних мереж
підземних рудників»

Комісія у складі: голови — декана електротехнічного факультету, доцента, к.т.н. В. Федотова, членів комісії: завідувача навчально-методичного відділу С. Івашура, завідувача кафедри електричної інженерії, професора, д.т.н. О. Сінчука, доцента кафедри електричної інженерії, к.т.н. І. Пересунька, доцента кафедри електричної інженерії, к.т.н. гаранта ОПП «Системи електропостачання промислових підприємств, міст і локальних об'єктів» О. Михайленко, склала цей акт, котрий засвідчує факт впровадження в освітній процес результатів дисертаційного дослідження М. Котякової на тему: «Оперативне керування напругою живлення споживачів електричних мереж підземних рудників», шляхом інтеграції матеріалів дисертаційного дослідження до: лекційного курсу та переліку практичних занять освітнього компонента «Електропостачання гірничих, гірничозбагачувальних та металургійних виробництв», що викладається для здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти за освітньо-професійною програмою «Системи електропостачання промислових підприємств, міст і локальних об'єктів» спеціальності G3 «Електрична інженерія» (відповідно до попереднього переліку — спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»).

З метою поглиблення професійної підготовки здобувачів освіти та ознайомлення їх із сучасними технологіями оперативного керування напругою як найбільш негативно впливового серед переліку інших показників якості електроенергії в електричних мережах підземних гірничорудних підприємств, до освітнього процесу було інтегровано наступні результати дисертаційного дослідження:

До лекційного курсу включено:

- методи оцінювання стану електроенергетичних комплексів мереж підземних рудників для визначення показників якості електроенергії в умовах невизначеності та неповноти інформації.

До практичних занять включено:

- удосконалений метод розрахунку та прогнозування змін показників якості електроенергії в системі електропостачання–електроспоживання підземних рудників.

Комісія засвідчує відповідність упроваджених результатів дисертаційного дослідження М. Котякової тематиці освітнього процесу та навчальним вимогам, що діють у Криворізькому національному університеті для підготовки здобувачів другого рівня вищої освіти за спеціальністю G3 «Електрична інженерія» (спеціальність 141 згідно з попередньою класифікацією).

Голова комісії:

Декан електротехнічного факультету,
к.т.н., доц.



Владислав ФЕДОТОВ

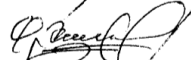
Члени комісії:

Завідувача навчально
методичного відділу



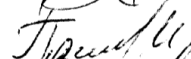
Світлана ІВАШУРА

Завідувач кафедри «ЕІ», д.т.н., проф.



Олег СІНЧУК

Доцент кафедри «ЕІ», к.т.н.



Ігор ПЕРЕСУНЬКО

Доцент кафедри «ЕІ», к.т.н., доц.



Олексії МИХАЙЛЕНКО

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор шахтоуправління
з підземного видобутку руди
ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг»



Антон ЧИРВА

2025 р.

АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи

КОТЯКОВОЇ Марини Геннадіївни «Оперативне керування напругою живлення
споживачів електричних мереж підземних рудників» подану на здобуття
наукового ступеня доктора філософії

Підземні рудники Криворізького залізорудного басейну характеризуються складними умовами експлуатації електроустаткування, значною довжиною шахтних електромереж, наявністю великої кількості електроприймачів з різною чутливістю до параметрів електропостачання, що створює підвищені вимоги до якості електроенергії, зокрема, до стабільності напруги. Навіть незначні відхилення напруги можуть призводити до зниження продуктивності видобутку залізної руди, зупинки обладнання і підвищення рівня аварійності. Зважаючи на це тема дисертаційної роботи Котякової Марини Геннадіївни є вельми актуальною для гірничорудних підприємств Кривбасу.

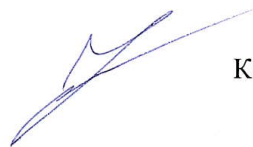
Автором за результатами роботи було розроблено комплекс рекомендацій щодо вдосконалення систем і алгоритмів моніторингу та оперативного керування напругою, котрий дозволяє при впровадженні забезпечувати оперативну автоматизовану стабілізацію величини напруги до стандартизованих значень на основі аналізу результатів вимірювання.

Відзначу, що первинна і кінцева частини роботи над дисертацією, зокрема, проведення моніторингу електричних параметрів в електромережі підземного рудника та впровадження результатів дослідження здійснювалося Котяковою Мариною Геннадіївною у тісній співпраці з інженерно-технічним персоналом шахти та передбачало адаптацію запропонованих алгоритмів оперативної стабілізації напруги до конкретних умов експлуатації. Це демонструє реальний характер дослідження та його спрямованість на практичний результат.

Впровадження результатів дисертації може забезпечити значний економічний ефект для гірничодобувних підприємств завдяки підвищенню якості роботи енергетичного господарства підземного рудника. Залежно від потужності такого рудника термін окупності заходів запропонованих в дослідженні, пов'язаних із впровадженням, зазвичай не перевищує 2...3 роки, що робить їх економічно обґрунтованими.

Цим актом підтверджується, що результати дисертаційного дослідження на тему: «Оперативне керування напругою живлення споживачів електричних мереж підземних рудників» Котякової Марини Геннадіївни можуть бути ефективно впроваджені у виробничий процес на підприємстві. Зокрема, розроблені в межах дисертаційної роботи методи та технічні рішення щодо підвищення ефективності керування якістю напруги були опрацьовані з метою подальшої оптимізації параметрів системи електропостачання підземних споживачів. Очікуваний економічний ефект, котрий може отримати підприємство становить 15,5...18,27 млн. грн. на рік (у цінах 2025 року).

Головний енергетик
шахтоуправління



Костянтин ШЕПЕЛЄВ

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Генеральний директор

ТОВ «Рудомайн»

Володимир КОЛЮС

«



ДОВІДКА

про впровадження результатів дисертації

Марини КОТЯКОВОЇ *«Оперативне керування напругою живлення споживачів електричних мереж підземних рудників»* подану на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

ТОВ «Рудомайн» є сучасним гірничо-видобувним підприємством, яке спеціалізується на видобутку та переробленню корисних копалин. Підприємство входить до числа ключових виробників мінеральної сировини в Криворізькому регіоні, забезпечуючи потреби металургійної та хімічної промисловості України та інших держав. Енергетичне господарство ТОВ «Рудомайну» представлено потужною електричною мережею, що живить численні підземні споживачі, включаючи системи вентиляції, водовідливу, гірничого транспорту та інше обладнання. Специфіка експлуатації цих мереж пов'язана зі складними умовами роботи, зокрема підвищеною вологістю, обмеженим простором і значною відстанню передачі електроенергії. Тому питання якості електроенергії для підприємства стоїть дуже гостро.

Основною метою застосування результатів дисертації Марини КОТЯКОВОЇ при потенційному впровадженні на підприємстві може бути усунення проблем, пов'язаних із коливаннями напруги, що виникають через пускові струми потужного обладнання, зміни навантаження та особливості розподілу потужності в розгалужених підземних мережах. Динамічний відновлювач напруги, встановлений у ключових вузлах електропостачання може забезпечити миттєве реагування на будь-які відхилення параметрів електромережі, підтримуючи стабільний рівень напруги в межах нормативних значень.

На підприємстві вже застосовується методика аналізу показників якості електроенергії, котра дозволяє визначити вразливі до коливань напруги ділянки в

підземній електромережі ТОВ «Рудомайн» задля оптимального визначення вузлів підключення стабілізуючого напругу обладнання.

Економічний ефект від впровадження включає як прямі, так і непрямі вигоди. До прямих відноситься зменшення витрат електроенергії на 10-12% та скорочення витрат на ремонт обладнання, пошкодженого через нестабільну напругу. Непрямі вигоди включають підвищення надійності роботи всього виробничого комплексу через зменшення простоїв. За попередніми оцінками, річний економічний ефект може сягати 18,2 млн гривень.

Така система стабілізації коливань напруги інтегрується і впроваджується в існуючий час до експлуатуємих на підприємстві засобів диспетчерського контролю. Це дозволить забезпечити комплексний підхід до керування якістю електроенергії на ТОВ «Рудомайн».

Отримані результати свідчать про достатню ефективність динамічних відновлювачів напруги як інструменту підвищення якості електроенергії в складних умовах підземних гірничих виробок.

Науково-обґрунтовані рішення щодо підвищення якості напруги запропоновані у дисертації Марини КОТЯКОВОЇ, і котрі впроваджуються на ТОВ «Рудомайн», можуть мати значний потенціал для масштабування на інших гірничодобувних підприємствах з аналогічними умовами експлуатації електромереж.

Головний енергетик

Сергій КОВЕРНИЙ