

Криворізький національний університет
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

БУДНІКОВ КИРИЛО ВСЕВОЛОДОВИЧ

УДК 621.313-57, 621.313.32

ДИСЕРТАЦІЯ

**ВАРІАТИВНІСТЬ СИСТЕМ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОГО
ФУНКЦІОНУВАННЯ КОМПЛЕКСІВ ВОДОВІДВЕДЕННЯ В
СТРУКТУРАХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ ЗАЛІЗОРУДНИХ ШАХТ**

Спеціальність 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Галузь знань 14 – «Електрична інженерія»

Подається на здобуття ступеня доктора філософії

ТОМ 1

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

_____ К. В. Будніков

Науковий керівник:

Сінчук Ігор Олегович,
кандидат технічних наук, доцент

Кривий Ріг – 2022

АНОТАЦІЯ

Будніков К.В. «Варіативність систем енергоефективного функціонування комплексів водовідведення в структурах електричних мереж залізорудних шахт».

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктор філософії. Спеціальність 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». Галузь знань 14 – «Електрична інженерія». Криворізький національний університет, Кривий Ріг, 2022. – Криворізький національний університет, Кривий Ріг, 2022.

Ефективність сучасної електроенергетики декларується як «максимізація ефективності використання всіх видів ресурсів і технологій при виробництві, передачі, розподілу та споживанні електричної енергії».

Більше 50% від усього обсягу електричної енергії, котру споживає промисловість України, споживають підприємства гірничодобувного комплексу. Ці підприємства належать до категорії енергоємних видів, що негативно відображається на рівні собівартості їх продукції – залізорудної сировини. З усього комплексу енергетичного впливу на вищезгаданий базовий показник функціонування економіки залізорудних підприємств виділяється електроенергетична складова – більше 90%.

Пов'язано це з існуючою технологією видобутку залізорудної сировини та відповідними наповненнями цього процесу енергоємними видами обладнання.

Проте, проблема енергоємності підземних залізорудних підприємств не обмежується тільки значними обсягами встановлених електричних потужностей їх споживачів. Значний вплив, як на власну – внутрішню електроенергетику, так і на функціонування централізованих генеруючих компаній, чинять і режими споживання електричної енергії даними підприємствами. В цьому аспекті найбільшими коливаннями в рівнях споживання електричної енергії цими підприємствами характеризуються коливання в годинах доби, котрі сягають 70-80% від середніх показників. Це, перш за все, результат циклічно-потоквої

технології ведення гірничих робіт і, в певній мірі, фривольного адміністративного впливу на цей процес з боку самих підприємств.

Найбільшим діапазоном вищезгаданих коливань відрізняються від інших споживачів комплекси відведення природних підземних вод на поверхню у спеціальні водозбірники.

Водночас, саме ці технологічні комплекси – споживачі електроенергії, котрі класифікуються як головні водовідливні установки, споживаючи більше 30% від загально обсягу електроспоживання шахтою, являють собою найбільш енергоємний вид з усіх видів стаціонарних установок даних видів шахт.

Встановлені загальні потужності електричних двигунів водяних насосів водовідливних установок по кожній залізорудній шахті в Україні становлять 17-18 ГВт.

Мета досліджень. Розроблення методів та заходів зниження електроенергоємності гірничодобувних виробництв шляхом прийняття варіативних енергоефективних управлінських рішень функціонування системи керування процесом електроспоживання головних водовідливних комплексів залізорудних шахт.

У дисертаційній роботі вирішувалось і вирішене **наукове завдання** – розроблення методів та засобів зниження електроенергоємності гірничовидобувних виробництв шляхом підвищення енергоефективності процесу функціонування головних водовідливних комплексів залізорудних шахт.

Базуючись на форматі відомих і, в певній мірі, апробованих спрямувань у вищезгаданому контексті наукового пошуку, як активне продовження процесу підвищення енергоефективності водовідливних комплексів, пропонується наступний варіант: не минаючи, а базуючись на платформі функціонування водовідливних комплексів у режимі «споживач-регулятор» електричної енергії, доповнити цей комплекс у синергетичному варіанті «споживач-регулятор-виробник електричної енергії».

У такому форматі процес підвищення енергоефективності гірничих підприємств лежить у площині реструктуризації існуючих електроенергетичних структур з варіанта централізованого електропостачання в структуру з автономними джерелами живлення електричної енергії і автоматизацією процесом її керування.

Як позитив до цього варіанта зазначимо, що тут до реалій досяжності енергоефективності гірничодобувних підприємств є значний власний базовий потенціал і, перш за все, в комплексі відведення підземних вод.

Технологічно доцільним у цьому спрямуванні буде шлях утілення в алгоритм вищезгаданого функціонування таким комплексом елементів інтелектуального керування, котрі повинні визначати і реагувати на процеси хаотичності та невизначеності поточних технологічних змін параметрів процесу водовідведення.

Між тим, як свідчать дослідження, шляхи такого «прозорого», на перший погляд, рішення далеко не тривіальні. Базуючись на висновках попередніх досліджень, ствердженням може бути констатація того, що для отримання відчутного ефекту для енергоекономіки гірничорудних підприємств і прийняття відповідних заходів щодо зміни алгоритму технології функціонування водовідливних комплексів необхідне диференційоване оцінювання впливу на процес водовідведення відповідної гама технологічних компонентів процесу, що аналізується, з відповідною адаптивною реакцією на них системи керування.

Найсуттєвіші результати дослідження, отримані в роботі, містять наступну наукову новизну:

вперше:

– обґрунтовано, форматизовано і проведено оцінювання потенціально нового синергетичного виду електроенергетичної структури системи відведення вод з підземних горизонтів гірничорудних шахт, що дозволяє форматизувати цей найбільш енергоємний споживач електричної енергії даних видів підприємств у

формат електроенергетичного комплексу: «споживач-регулятор-генератор електричної енергії» з отриманням значного рівня енергоефективності;

– визначено принципи формату методів оцінювання рівнів електроспоживання водовідливними комплексами залізрудних шахт і диференційно оцінено вплив на цей процес технологічних параметрів конкретних підприємств. Побудована методологічна карта, яка враховує і комплексно інтегрує такі явища, як: моніторинг споживання електроенергії водовідливними комплексами залізрудної шахти з позиції системності; формування інформаційної бази щодо оцінювання співвідношення вартості та обсягів споживання електричної енергії цими видами споживачів електричної енергії; контроль за ходом і характером змін виконання планових завдань на рівні споживання електричної енергії водовідливними комплексами для реалізації стратегії підвищення електроенергоефективності залізрудних шахт;

– на основі ретроперспективного аналізу систематизовано та розширено існуючі кордони автоматизованого керування процесом відведення підземних вод як локального процесу в підпорядкуванні комплексу управлінських рішень автоматизованої системи керування електроенергетичним комплексом «енергопостачання-енергоспоживання» залізрудної шахти, що дозволить зменшити енергоємність видобуваємих копалин;

розглянуто:

– методи підходу до формування комплексного оцінювання електроспоживання водовідливними комплексами залізрудних шахт, які, на відміну від існуючих, орієнтовані на розвиток інформаційно-аналітичної підтримки процесу оптимізації споживання електроенергії, модифіковані відповідно до галузевих особливостей, враховують синергетичні ефекти, що дозволило визначити і врахувати специфіку досліджуваних процесів з конкретизацією стосовно саме специфіки технології залізрудних шахт;

набули подальшого розвитку:

– формування корпоративної системи моделей процесу електроспоживання складовими водовідливних комплексів на залізорудних шахтах, яка, на відміну від існуючих, враховує технологічні етапи видобутку залізної руди, що відбуваються на різних виробничих комплексах, як єдиного цілого в системі «електропостачання-електроспоживання», що дозволяє оцінити електроенергоефективність як комплекс складових і вибрати напрямки її підвищення з урахуванням технологічних процесів;

– методичний підхід до прогнозування рівнів електроспоживання водовідливними установками залізорудних шахт на засадах екстраполяції та використання ідентифікації дискретних часових рядів, що дозволяє визначати прогнозні значення обсягів електроспоживання водовідливними установками;

– методи оцінювання ефективності застосування як окремих сегментів, так і всього енергетичного комплексу енергоємних виробництв на прикладі залізорудних підприємств із підземним способом видобутку залізорудної сировини.

Практичне значення отриманих результатів полягає у розробці методології зниження витрат електроенергії, а відповідно і вартісних показників щодо процесу відкачування води з підземних горизонтів залізорудних шахт. Одержані наукові результати, а саме: методологія підвищення енергоефективності комплексів водовідведення залізорудних шахт, впроваджено в ТОВ «НВК Криворіжелектромонтаж», що підтверджено актом про впровадження від 07.03.2021 р. Результати роботи також використовуються у Криворізькому національному університеті на кафедрі автоматизованих електромеханічних систем у промисловості та транспорті для підготовки фахівців за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», довідка про впровадження від 07.04.2022 р.

Структура дисертаційного дослідження виглядає в форматі 2-х томів, а саме:

У **Вступі** цієї роботи викладено актуальність, мету, наукові завдання, котрі вирішувались при виконанні дисертаційної роботи, та наукова новизна отриманих результатів.

У **Розділі 1** на основі багаточисленних експериментальних досліджень, отриманих в умовах діючих підземних залізрудних підприємств України, проаналізовано рівні споживання електричної енергії в часі, формалізовано ряд енергоємних споживачів і оцінено режими їх споживання та форматизовано метод досліджень.

У **Розділі 2** з'ясовано формування інформаційно-аналітичного забезпечення і запропоновано дефініцію «енергетична інформаційна система»; досліджено множину критеріїв споживання електроенергії щодо мінімізації вартості та забезпеченні необхідного обсягу споживання електричної енергії; побудовано й адаптовано багатofакторну регресійну модель функціонування режимів електроспоживання водовідливними комплексами шахт; запропонована методика оцінювання ефективності споживання і відповідної вартості електричної енергії.

Розділ 3 містить теоретичні аспекти досліджень із форматизації структур і параметрів розбудови в кордонах структури алгоритму функціонування гірничорудного підприємства підсистеми автоматизованого керування процесом відведення вод із підземних горизонтів залізрудних шахт.

У **Розділі 4** (та як повноцінне доповнення до нього Додатку Д) розглянуто і наведено результати дослідницького комплексу оцінювання утілення у структури дослідницького комплексу з оцінювання результатів утілення у структури систем електропостачання реальних діючих залізрудних шахт варіантів із розбудови на технічній основі головних водовідливних комплексів залізрудних підприємств пікових видів гідроакумуючих електростанцій.

У **Заключних висновках** дисертаційної роботи викладено основні здобутки, котрі отримані в процесі виконання досліджень, і рекомендації до їх реалізації у практику роботи гірничодобувних підприємств.

У **Додатках** (том 2) надані додаткові дослідницькі матеріали і документи, що підтверджують результати впровадження отриманих наукових результатів у практику роботи відповідних промислових підприємств і в навчальний процес Криворізького національного університету.

Ключові слова: електрика; енергетика; керування; процес; автоматизація; методи; моделювання; ефективність; гірництво; шахта.

ABSTRACT

Budnikov K.V. Variability of energy-efficient operation systems of water drainage complexes within power grids of iron ore underground mines

Thesis for a Doctor of Philosophy degree in Engineering. Specialty 141 “Electric Power Engineering, Electrotechnics and Electromechanics” in Knowledge Area 14 “Electric Engineering”. – Kryvyi Rih National University of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Kryvyi Rih, 2022.

Efficiency of modern power engineering is defined as “maximizing efficiency of applying all types of resources and technologies to production, transmission, distribution and consumption of power.”

Over 50% of the total amount of power consumed by Ukraine’s industry is used by its mining enterprises as belonging energy-intensive types, this negatively affecting cost for their products – iron ore raw materials. The power component of over 90% makes the most significant impact on the above-mentioned basic indicator of functioning of iron ore mining enterprises’ economy. This is due to the current technology of iron ore mining and the corresponding energy-intensive types of equipment involved.

However, the problem of energy intensity of underground iron ore mining enterprises is not limited only to significant volumes of installed electrical capacities of their consumers. A significant impact, both on their own internal power complex and on the functioning of centralized generating companies, is also exerted by power consumption modes of these enterprises. In this aspect, the greatest fluctuations in the levels of power consumption depend on hours of the day, reaching 70-80% on average. This primarily results from the in-pit crushing and conveying technology of mining operations and, to a certain extent, frivolous administrative influence on this process by the enterprises themselves.

Complexes pumping natural groundwater to the day surface into special reservoirs are noted for the greatest range of the above-mentioned fluctuations compared to other consumers.

Simultaneously, these technological complexes – power consumers classified as main drainage facilities – require over 30% of the total volume of power consumed by an underground mine and are the most energy-intensive among other types of stationary facilities at these mine types.

The established total power capacity of electric motors of water pumps of water drainage complexes for each underground mine in Ukraine makes 17-18 GW.

The research aims at developing methods and measures to reduce energy intensity of mining enterprises by making variable energy-efficient managerial solutions for functioning of the control system of power consumption of main water drainage complexes at iron ore underground mines.

The thesis also solves the **scientific problem** of developing methods and tools to reduce energy intensity of mining enterprises by increasing energy efficiency of functioning of main water drainage complexes of iron ore underground mines.

The format of well-known and, to a certain extent, proven trends in the above-mentioned context of scientific search enables improving energy efficiency of water drainage complexes by applying the following option. Based on the platform for water drainage complexes functioning in the "power consumer-regulator" mode, it is suggested to supplement this complex and make a synergistic option – "power consumer-regulator-producer".

In this format, the process of improving energy efficiency of mining enterprises consists in restructuring existing power structures with centralized power supply, converting them into those with autonomous power supply sources and automated control over them.

The above option is characterized by a significant potential in achieving the maximum energy efficiency of national mining enterprises, in particular, of their water drainage complexes.

Technologically, it is expedient to include some smart control elements into the ACS functioning, which are designated to determine and respond to processes of chaotic and uncertain nature characteristic of current changes in technological parameters of the water drainage process.

Meanwhile, according to the research, the ways of such a "transparent" at first glance solution are far from being trivial. Based on the research conclusions, it can be ascertained that to obtain a tangible effect from energy saving measures implemented at ore mining enterprises and adopt appropriate steps to change the algorithm of the water drainage technology, one needs to apply differentiated assessment of the impact of technological components of the analyzed process accompanied by a relevant response of the control system to these impacts.

The most significant results of the research contain the following scientific novelty:

for the first time:

- a potentially new synergistic type of power structure of the water drainage system for underground mines is substantiated, formatted and assessed to convert this most energy-intensive power consumer of these enterprise types into the complex "power consumer-regulator-generator", this allowing us to achieve significant energy efficiency;

- principles of creating the format of methods for assessing power consumption levels of water drainage complexes at iron ore underground mines are determined and the impact on this process of technological parameters of specific enterprises is differentially assessed. A methodological map is built to consider and comprehensively integrate such phenomena as: monitoring power consumption of water drainage complexes at iron ore underground mines from the point of view of systemacy; forming

an information base for assessing the ratio of the cost and volume of power consumed by these types of power consumers; controlling the progress and nature of changes in performing scheduled tasks on the power consumption level of water drainage complexes to implement the strategy for increasing energy efficiency of iron ore underground mines;

- based on retrospective analysis, the existing boundaries of automated control over groundwater drainage as a local process are systematized and expanded within a complex of managerial decisions for the automated control system of the power complex "power supply-consumption" of the iron ore underground mine to reduce energy-intensity of mineral mining;

reviewed:

- methods of the approach to formatting comprehensive assessment of power consumption by water drainage complexes of iron ore underground mines are considered and, unlike existing ones, they are focused on developing information and analytical support for optimizing power consumption, modified in accordance with industry features, considering synergistic effects, which makes it possible to determine and take into account the processes under study, thus specifying the technology applied to iron ore underground mines;

the following issues have acquired further development:

- formation of a corporate system of power consumption models with components of water drainage complexes at iron ore underground mines, which, unlike existing ones, considers technological stages of iron ore mining taking place at various production complexes as a single whole in the system of "power supply-consumption", evaluates energy efficiency as a complex of components and selects directions for its increase taking into account technological processes;

- a methodical approach to forecasting the levels of power consumption by water drainage facilities at iron ore underground mines on the basis of extrapolation and

application of identification of discrete time series to determine forecast values of power consumption of water drainage facilities;

– methods for assessing efficiency of both individual segments and the entire energy complex of energy-intensive industries on the example of iron ore mining enterprises with an underground method of mining iron ore raw materials.

Practical significance of the results obtained implies developing methods for reducing power consumption and relevant cost indices for water drainage complexes of iron ore underground mines. There are scientific results which include developed methods for improving energy efficiency of mine water drainage complexes implemented at the LLC “SPC Kryvorizhelectromontazh”, which is confirmed by the implementation act of 07.03.2021. The research results are also used at Kryvyi Rih National University at the Department of Automated Electromechanical Systems in Industry and Transport for training specialists in Specialty 141 "Electric Power Engineering, Electrotechnics and Electromechanics", confirmed by the implementation certificate as of 07.04.2022.

The thesis consists of two volumes, including:

The introduction of the research outlines the relevance, purpose, scientific problems solved and the scientific novelty of the results obtained.

In **Section 1**, on the basis of numerous experimental results obtained at operating iron ore underground mining enterprises of Ukraine, temporal levels of power consumption are analyzed, some energy-intensive consumers are formalized, their consumption modes are assessed and the research method is formatted.

Section 2 specifies formation of information and analytical support and proposes a definition of an “energy information system”. It investigates into a set of criteria for power consumption to minimize its cost and ensure the required amount of power consumed. A multifactor regression model of power consumption modes for water drainage complexes of iron ore underground mines is built and adapted. The research also suggests a method of assessing power consumption efficiency and its relevant cost.

Section 3 highlights theoretical aspects of the research aimed at formatting structures and parameters of developing a subsystem of the automated control over the water drainage process from underground mine levels within the algorithm of mining enterprise functioning.

Section 4 and Appendix D supplementing it contain the results of the research complex for assessing implementation of options of developing peak types of pump-storage facilities on the technical basis of main water drainage complexes of operating iron ore mining enterprises.

The **conclusions** of the thesis describe main achievements obtained in the process of the research and recommendations for their implementation at ore mining enterprises.

Appendixes (Volume 2) provide additional research materials and documents confirming implementation of the scientific results in the practice of relevant industrial enterprises and the educational process of Kryvyi Rih National University.

Keywords: power, power engineering; control; process; automation; methods; modelling; efficiency; mining; underground mine.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Монографія

[1] Fundamentals of integrating smart technologies for controlling power systems at iron ore underground mining enterprises /Monograph/ I. Sinchuk, K. Budnikov, R. Krasnopolsky.– Warsaw: iScience Sp.z.o.o.– 2021.– 123 p. ISBN 978-83-66216-50-1;

Стаття в міжнародному періодичному виданні, який внесено до міжнародної науково-метричної бази даних Scopus

[2] K. Budnikov, O. Sinchuk, I. Sinchuk, T. Beridze, Y. Filipp, O. Dozorenko, and R. Strzelecki. Assessment of the factors influencing on the formation of energy-oriented modes of electric power consumption by water-drainage installations of the mines. *Mining of Mineral Deposits*, Vol. 15, no 4, 2021, pp. 25-33. <https://doi.org/10.33271/mining15.04.025> (Scopus);

Статті у фахових виданнях

[3] K. Budnikov, I. Kozakevych. Predictive control of induction motor drive. Second international conference on sustainable futures: environmental, *Technological, Social and Economic Matters*. 19-21 may, 2021, *Kyvyi Rih, Ukraine*, E3S Web of Conferences 280, 05006 (2021). <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128005006>

[4] K. Budnikov, O. Sinchuk, R. Strzelecki, I. Sinchuk, A. Kupin, T. Beridze. Informational aspects at model of power consumption by main drainage facilities of iron-ore mining enterprises. *Herald of Advanced Information Technology 2021*; Vol.4 No.4, pp. 341 – 353. <https://doi.org/10.15276/hait.04.2021.5> (Фахове видання категорія Б).

[5] K. Budnikov, I. Sinchuk, A. Somochkyn, S. Somochkyna, V. Baranovskyi, O. Danilin. Modeling tools for improving energy efficiency of water drainage complexes at iron ore underground mines. *Herald of Advanced Information Technology 2022*; Vol.5 No.1, pp. 40 – 51. DOI: <https://doi.org/10.15276/hait.04.2022.4> (Фахове видання категорія Б).

[6] Будніков К. В., Сінчук О. М., Купін А. І., Сінчук І. О., Барановська М. Л. До розробки алгоритму енергоефективного керування електроенергетичним комплексом з розділеною генерацією електричної енергії в умовах залізрудних шахт. *Вісник Криворізького національного університету*, №53, 2021, с. 118-126. <https://doi.org/10.31721/2306-5451-2021-1-53-112-118>; (Фахове видання категорія Б);

[7] Будніков К. В., Сінчук О. М., Михайленко О. Ю., Купін А. І., Пересунько І. І., Барановський В.Д. Нечітка система керування процесами «енергопостачання-енергоспоживання» в енергосистемах залізрудних шахт з розподіленою генерацією. *Гірничий вісник*, Вип. 110, 2022, с. 118-126. (Фахове видання категорія Б);

[8] K. Budnikov, I. Sinchuk, T. Beridze, V. Fedotov, V. Baranovskyi, I. Peresunko. Modelling basic parameters to control a local power complex of water drainage facilities at iron ore mines. *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. 2022. № 1. с. 33–38 DOI: 10.30929/2072-2052.2022.1.57.33-38 (Фахове видання категорія Б);

Стаття у науковому журналі

[9] Будніков К. В., Сінчук О. М., Філіпп Ю. Б., Сінчук І. О., Михайленко А. Ю., Краснопольський Р. І. До проблеми створення синергетичних електроенергетичних комплексів з піковими ГАЕС на основі водовідливних систем залізрудних шахт. *Гідроенергетика України*, № 3-4, 2021, с. 83-89;

Тези доповідей конференцій

[10] Будніков К. В., Сінчук О. М., Краснопольський Р. І. Синергетична електроенергоефективна ситема керування електромеханічних комплексів вентиляторів головного провітрювання шахт. *V Міжнародна науково-технічна конференція «Оптимальне керування електроустановками»* 19-20 жовтня, 2021 р., Вінницький національний технічний університет. <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/okey/okey2021/paper/view/13820>;

[11] К. В. Будніков, І. А. Козакевич. Базові принципи формування предиктивних систем керування електроприводами змінного струму. *Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «Розвиток промисловості та суспільства» 2021*, Криворізький національний університет, с. 62;

[12] Будніков К.В., Барановський В.Д., Краснопольський Р.І. Теоретичні імперативи енергоефективності залізрудних підприємств. *Всеукраїнська науково-практична конференція студентів та молодих учених «Актуальні питання енергоефективності гірничо-металургійного виробництва» 25-27 листопада, 2021 р., Криворізький національний університет, м. Кривий Ріг, 2022 р., с. 26-27;*

[13] Будніков К.В., Краснопольський Р.І. Математичне моделювання оцінювання рівнів енергоорієнтовних режимів споживання електричної енергії водовідливними установками шахт. *Всеукраїнська науково-практична конференція студентів та молодих учених «Актуальні питання енергоефективності гірничо-металургійного виробництва» 25-27 листопада, 2021 р., Криворізький національний університет, м. Кривий Ріг, 2021 р., с. 24-25;*

[14] Mykhailenko O., Budnikov K. Economic aspects of introducing pumped-storage hydroelectric power plants into the mine dewatering system for distributed power generation. *The 3rd International Conference on Sustainable Futures: Environmental, Technological, Social and Economic Matters*. Kryvyi Rih, Ukraine, 24-27 May 2022. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 20 p.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	22
ВСТУП.....	23
РОЗДІЛ 1. ПРОЦЕС ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ-ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ ЗАЛІЗОРУДНИХ ПІДПРИЄМСТВ З ПІДЗЕМНИМ СПОСОБОМ ВИДОБУТКУ ЗАЛІЗОРУДНОЇ СИРОВИНИ. СТАН, ПРОБЛЕМИ, ЗАВДАННЯ.....	36
1.1 Загальні питання електроенергетики та вплив на них технології функціонування ринку електричної енергії.....	36
1.2 Аналіз поточного стану процесу постачання та споживання електричної енергії гірничорудними підприємствами з підземним способами видобутку залізорудної сировини	41
1.3 Аналіз технологічних та електроенергетичних параметрів при відведенні підземних вод з виробок залізорудних шахт.....	55
1.4 Аналіз наукових доробок з вирішення проблеми підвищення електроенергоєфективності водовідливних комплексів гірничих підприємств.....	65
1.5 Форматизація наукових задач та визначення мети досліджень.....	70
1.6 Висновки до розділу 1.....	73
РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ ТА ВСТАНОВЛЕННЯ ВПЛИВОВИХ ФАКТОРІВ ДЛЯ ФОРМУВАННЯ ЕНЕРГООРІЄНТОВАНИХ РЕЖИМІВ СПОЖИВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ ВОДОВІДЛИВНИМИ КОМПЛЕКСАМИ ЗАЛІЗОРУДНИХ ШАХТ.....	74

2.1 Загальні проблеми та логістика комплексної оцінки електроспоживання водовідливними комплексами залізрудних шахт.....	74
2.2 Аналіз вибору критеріїв оптимального електроспоживання енергоємними складовими залізрудних підприємств.....	80
2.3 Моделювання процесу оцінювання електроспоживання водовідливними комплексами залізрудних шахт.....	94
2.4 Висновки до розділу 2.....	120
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА АВТОМАТИЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ВІДВЕДЕННЯ ВОД З ПІДЗЕМНИХ ГОРИЗОНТІВ ЗАЛІЗРУДНИХ ШАХТ ЯК ПІДСИСТЕМ КОМПЛЕКСНОЇ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ АСК «ЕЛЕКТРОЕНЕРГОПОСТАЧАННЯ -ЕЛЕКТРОЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ».....	122
3.1 Передумови застосування підходу та постановка завдання.....	122
3.2 Формалізація завдань автоматизованого керування процесом водовідведення в умовах залізрудних шахт.....	123
3.3 Узагальнений алгоритм багатфункціонального інтелектуального керування.....	126
3.3.1. Розробка алгоритму інтелектуального багатфункціонального керування електроенергоспоживанням.....	127
3.3.2. «Плаваючий» добовий тариф.....	129
3.3.3. Апріорне оцінювання ефективності запропонованих алгоритмів керування.....	133
3.4 Розробка структури інтелектуальної АСК на основі нечіткої логіки (Fuzzy Logic).....	136

3.4.1. Принципи фазифікації та формування бази логічних правил виведення в умовах одноканального керування (для двотарифного випадку типу «Економ/Пік»)..	136
3.4.2. Принципи фазифікації та формування бази логічних правил виведення в умовах двоканального керування.....	138
3.4.3. Принципи фазифікації та формування бази логічних правил виведення в умовах триканального керування.....	139
3.4.4. Принципи побудови нечітких регуляторів інтелектуальних АСК.....	140
3.5 Моделювання роботи АСК в режимі водовідведення.....	141
3.5.1. Моделювання одноканального керування.....	144
3.5.2. Моделювання багатопараметричного варіанту керування	145
3.6 Моделювання роботи АСК в режимі генерації електричної енергії	147
3.7 Висновки до розділу 3.....	150
РОЗДІЛ 4. ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ПІКОВИХ ГІДРОАКУМУЛЮЮЧИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ У СТРУКТУРАХ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЗАЛІЗОРУДНИХ ШАХТ.....	151
4.1 Узагальнення до досліджень ефективності застосування ГАЕС як пікових варіантів генерації електропостачання залізорудних шахт.....	151
4.2 Моделювання та превентивне оцінювання витрат електричної енергії згідно варіативності структур розбудови пікових гідроакумулюючих електростанцій.....	154

4.3 Оцінювання ефективності застосування гідроакумуючих електростанцій на основі комплексів водовідведення залізрудних шахт.....	158
4.3.1 Загальна характеристика порівнюваних конфігурацій систем електропостачання залізрудних шахт та умов проведення експериментальних досліджень.....	158
4.3.2 Узагальнення результатів модельних досліджень з оцінюванням варіантів ефективності застосування пікових гідроакумуючих електростанцій на основі водовідливних комплексів залізрудних шахт.....	162
4.4 Висновки до розділу 4.....	163
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	166
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ.....	172

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ВВП	– внутрішній валовий продукт;
ЗРС	– залізорудна сировина;
ГАЕС	– гідроакумуюча електростанція;
ТЕС	– теплоенергетична станція;
ЕЕ	– електрична енергія;
ГВУ	– головні водовідливні установки;
ГВК	– головні водовідливні комплекси
АСК	– автоматизована система керування;
СВПВ	– система відведення підземних вод;
МНК	– метод найменших квадратів
ПБ	– правила безпеки
ПТЕ	– правила технічної експлуатації
ПЧ	– перетворювач частоти
АД	– асинхронний електричний двигун
СЕП	– системи електропостачання
ДСФ	– дробильно-сортувальна фабрика
ПЕР	– паливно-енергетичні ресурси
АДЖ	– автономні джерела живлення електричної енергії

ВСТУП

Електроенергетика як складова енергетичної галузі промисловості в реальному часі являє собою базоутворюючий сегмент ствердження незалежності держави та розбудови шляхів самостійності її розвитку [1-5].

Певний рівень розуміння такої ситуації в ієрархії структур української державності стало тим позитивом, котрий спонукав і спонукає до видобудови законотворчих стратегій у форматизації позитивів цього пошукового процесу «зверху» до «низу»: держава – підприємства.

На початок 2021 року більше 55% від загальнопромислового обсягу споживання електричної енергії в Україні припало на металургійні підприємства – 35%, та їх базові сировинні партнери – гірничовидобувні – 20% [6]. Ці цифри віддзеркалюють факт значної енергоємності підприємств галузі. Такий одіозний факт негативно впливає на загальний стан економіки гірничовидобувних підприємств, а в кінцевому варіанті на їх конкурентоспроможність на світовому ринку сировини, де Україна посідає гідне місце, що, в свою чергу, дозволяє щорічно поповнювати валютні запаси держави на 60-70% [7].

В реаліях сучасної як політичної, так і економічної ситуації в Україні, такий позитив може бути зруйнований, що призведе до трагічних наслідків для держави, народу.

Одним із найбільш вагомих факторів впливу на стабільність та ефективність функціонування гірничовидобувних підприємств сировинної бази металургійної галузі є технічна стабільність живлення та економічна доцільність отримуваних видів енергетичних послуг. Така ситуація формує логістику досліджень.

Обґрунтування вибору теми досліджень. Базоутворюючою складовою рівня енергоефективності (енергоємності) видобутку корисних копалин взагалі, а залізорудної сировини зокрема, виступає технологія видобутку.

Згідно досліджень вчених гірників-технологів існуючі технології видобутку залізорудної сировини в найближчі 50-70 років не будуть змінюватись [8-10]. Між тим, існуючі технології функціонуючих сучасних гірничорудних підприємств як з відкритим – кар’єрним, так і з підземним – шахтним способом видобутку ЗРС приречені на постійне зниження з часом глибин видобутку корисних копалин, що вже при апріорному оцінюванні енергетичних перспектив відхиляє можливість природного зменшення обсягів споживання електричної енергії цими видами підприємств.

Більш того, як доведено [11], процес зниження рівнів ведення підземних гірничих робіт на вітчизняних залізорудних шахтах по собі визначає постійний приріст зростання обсягів споживання ЕЕ. Щорічно цей приріст сягає більш ніж 1 кВт·год. на 1 тону ЗРС, що видобувається підземним способом [12]. Тим самим, цей одіозний процес фактично поглинає ті позитивні частки сегментів енергоефективності, котрі можуть і досягаються на підприємствах шляхом запровадження ряду тривіальних енергоорієнтованих локальних заходів.

Безумовно, вищевикладене в жодній мірі не ставить під сумнів необхідність і доцільність будь-яких заходів щодо підвищення енергоефективності видобутку ЗРС, хоча максимальний ефект у напрямку підвищення електроенергоефективності видобутку ЗРС може бути і буде досягнуто лише при комплексному втіленні всіх можливих і доступних, на дійсний момент часу, заходів із включенням їх в єдину централізовану автоматизовану систему управління енергетикою підприємства [13-19].

Як позитивний базовий момент залізорудних шахт на шляху розбудови схеми, досягнення очікуваного рівня енергоефективності, на відміну від їх аналогів - вугільних, соляних та ін., є те, що згідно технології функціонування даних видів підприємств, у формуванні обсягів електроспоживання ними, у виробничому процесі задіяна обмежена кількість енергоємних споживачів [20-22]. До таких видів споживачів цих підприємств належать компресорні станції,

скіповий підйом ЗРС, дробильно-сортувальна фабрика, головні вентиляційні та водовідливні комплекси. Саме на долю цих споживачів припадає більше 90% від усього обсягу ЕЕ, котру споживає типова вітчизняна залізорудна шахта [23].

Такі рівні є результатом значних матеріальних витрат підприємств за спожиті обсяги ЕЕ, що негативно віддзеркалюється на економіці підприємств [10, 24-26].

Враховуючи та оцінюючи технологію циклічно-потокowego характеру функціонування вище згаданих споживачів, логічно потенційно перекласифікувати їх із розряду «споживач» у розряд «споживач-регулятор» ЕЕ.

При такому рішенні алгоритм роботи електромеханічних комплексів (перш за все енергоємних споживачів) базується на двоєдиному варіанті їх функціонування: режим із мінімальноможливим і з максимальнодопустимим рівнями споживання ЕЕ.

Суть підходу базується на тому, що години доби умовно діляться на періоди «піку» (як правило, денний час) та «економічні» (нічний час).

Логіка рішення полягає в тому, що в години «пік» приймачі працюють у мінімальнospоживчому режимі, а в «економічні» – в режимі максимального навантаження. Саме такий варіант активно реалізується в практику роботи промислових, у т. ч. гірничих підприємств України.

Разом з тим зазначимо, що, як правило, практика таких рішень ґрунтується скоріше на превентивному очікуванні ефекту, ніж на обґрунтованих реаліях.

Та все ж зазначимо, що, як свідчать результати досліджень, у т. ч. автора [27-46], варіант пошуку шляхів вирішення проблеми енергоефективності залізорудних підприємств, що аналізується, дає і вже дав певний ефект. Проте, значний рівень потенціалу в цьому спрямуванні продовжує існувати і його треба реалізовувати. Більш того, існуюча з 01.01.2019 р. схема розрахунків між споживачами та організаціями генеруючими ЕЕ – погодинні змінні протягом 24-

х годин доби тарифи, додає значного креативу в процес дослідження цього спрямування.

При цьому зазначимо, що такий варіант спрямувань з пошуку шляхів підвищення енергоефективності має місце при всіх інших варіаціях розбудови схем (режимів) функціонування енергоємних систем і комплексів гірничих підприємств.

Другим сучасним підходом до проблеми підвищення енергоефективності гірничих підприємств є реструктуризація існуючих електроенергетичних структур з централізованим електропостачанням у структури з розсередженою генерацією ЕЕ. Як зазначалось попередю, така варіація особливо актуальна в реаліях сучасності.

Як позитив до цього варіанту, то тут для реалій досяжності енергоефективності гірничовидобувних підприємств є значний власний базовий потенціал [47-79].

У комплексі такого потенціалу вигідно для отримання значимого ефекту з загального переліку енергоємних споживачів-регуляторів ЕЕ залізорудних підприємств виділяються комплекси відведення вод з підземних гірничих виробок на денну поверхню у спеціальні водозбірники.

Враховуючи, що саме зазначені ГВК споживають більше 35% від усього обсягу споживання ЕЕ залізорудною шахтою, то логічно, що вирішення проблеми енергоефективності даних видів гірничих підприємств треба почати перш за все з цих споживачів.

Між тим, шляхи такого «прозорого», на перший погляд, рішення далеко нетривіальні. Базуючись на висновках досліджень, ствердженням може бути констатація того, що для отримання відчутного ефекту для енергоекономіки гірничорудних підприємств і прийняття відповідних енергоекономічних заходів щодо зміни алгоритму технології функціонування ГВК необхідне диференційоване оцінювання впливу на процес водовідведення відповідної гами

технологічних компонентів процесу, що аналізується, з провідною реакцією на їх системи керування.

Досягнення бажаного при цьому рівня ефективності може бути сформоване на платформі створення відповідної автоматизованої системи керування режимами роботи ГВК з обґрунтуванням і формалізацією всього комплексу впливових факторів в алгоритм її роботи.

Водночас, спираючись на все ті ж результати досліджень, зазначимо, що в розробці структури та параметрів алгоритму функціонування такої АСК є свої системоутворюючі складності. Головними з них є те, що формування єдиного для всіх шахт алгоритму управлінського керування режимами роботи ГВК неможливо. Пов'язано це з тим, що природний непрогнозований як в часі, так і в обсягах стохастичний процес заповнення підземних виробок шахт водою для кожного підприємства характеризується своїми системоутворюючими моментами, без урахувань котрих в алгоритмі функціонування ГВК отримати позитивне рішення з достатнім рівнем ефекту неможливо. Водночас нелогічним слід признати ідею розробки індивідуального варіанту алгоритму роботи АСК.

Технологічно доцільним виглядає шлях утілення в алгоритм функціонування АСК елементів, інтелектуального керування, котрі повинні визначати та реагувати на процеси хаотичності і невизначеності поточних змін у функції технологічних параметрів процесу водовідведення [50-54].

Проте і в такому необхідному варіанті робота ГВК в режимі споживач-регулятор ЕЕ не вичерпає свого позитиву можливостей і перспективи даних видів енергоспоживачів у підвищенні їх енергоефективності.

Як активне продовження процесу підвищення енергоефективності ГВК, то тут може існувати напрямок: не минаючи, а базуючись на режимі функціонування ГВК «споживачі-регулятори» ЕЕ, доповнити цей комплекс у синергетичному варіанті «споживач-регулятор-виробник» ЕЕ.

Таке спрямування розуміється на створенні на основі ГВК залізорудних шахт (рудників) гідроакумуючих електростанцій, котрі в основі своїй повинні функціонувати в години «пік», хоча цей термін, за необхідністю, може бути збільшено. Для цього структура ГВК повністю відповідає структурі розбудови цих видів електростанцій. При цьому доповнемо актуальність цього спрямування ще таким сучасним позитивом, що такі ГАЕС можуть і будуть являти собою резервні джерела генерації ЕЕ не тільки для самих підрозділів, а й для потреб прилеглих місцевих територій.

З ряду об'єктивних причин, більшість, з відомих автору, досліджень велись, базуючись на віртуальних, а не на реально існуючих технологічних параметрах функціонування ГВК. Водночас, навпаки, з «кейса», що аналізує науковий пошук не поодинокими авторами, виглядають і дослідження в суто адресному варіанті – лише для умов конкретної шахти. Та все ж, обмежені результати як перших, так і інших пошукових спрямувань, надали необхідного базового позитиву для послідовників. Це, перш за все, можливість розширення кордонів подальших пошуків і, по-друге, можливість отримання уніфікованих - інтегрованих результатів.

Саме в такому ракурсі згідно вищенаведеної мотивації, будувався формат цього наукового пошуку.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Основний зміст роботи базується на результатах досліджень, що проводились на кафедрі автоматизованих електромеханічних систем у промисловості та транспорті Криворізького національного університету у відповідності до наукового напрямку «Розроблення комплексу заходів по енергозбереженню на підприємствах залізорудної промисловості». Дисертаційна робота виконувалася відповідно до «Програми наукових досліджень і розробок Міністерства освіти і науки України за пріоритетними напрямками розвитку науки та техніки» у рамках науково-дослідних робіт № 0121U111709 «Інтеграція

розумних технологій побудови електроенергетичних систем у контексті підприємств гірничо-металургійної галузі». Результати дисертаційної роботи одержано під час виконання НДР «Розроблення комплексу заходів по енергозбереженню на підприємствах залізорудної промисловості» (№ НДР 0114U003457); НДР «Розроблення енергозберігаючих заходів на підприємствах гірничодобувної промисловості» (№ НДР 0115U03180); НДР «Спосіб зниження струмів витоку в електричних комбінованих мережах залізорудних шахт» (№ 0116U1788); НДР «Аспекти теорії та практики оцінки електроенергетичної конкурентноспроможності залізорудних підприємств» (№ НДР 0118U006520).

Мета досліджень. Розроблення методів та заходів зниження електроенергоємності гірничодобувних виробництв шляхом прийняття варіативних енергоефективних управлінських рішень функціонування системи керування процесом електроспоживання головних водовідливних комплексів залізорудних шахт.

У дисертаційній роботі вирішувалось і вирішене **наукове завдання** – розроблення методів та засобів зниження електроенергоємності гірничовидобувних виробництв шляхом підвищення енергоефективності процесу функціонування головних водовідливних комплексів залізорудних шахт.

Для досягнення поставленої мети в роботі форматизовано та вирішено наступні завдання:

- аналіз стану та оцінювання реалій потенціалу з підвищення енергоефективності комплексів відведення вод з підземних горизонтів залізорудних шахт (рудників);

- на основі значимих по обсягу експериментальних даних досліджень в умовах діючих залізорудних шахт встановити доцільність та оцінити перспективу переорієнтації головних водовідливних комплексів з «споживачів-регуляторів» в клас «споживач-регулятор-виробник» електричної енергії як

автономних джерел живлення для включення їх в структуру систем електропостачання;

- визначити корпоративну систему моделей процесу електроспоживання водовідливними комплексами залізорудних шахт та сформуванати методикy комплексного оцінювання електроспоживання даними комплексами залізорудних шахт;

- побудувати прогноз електроспоживання водовідливними комплексами залізорудних шахт задля прийняття відповідних управлінських рішень щодо забезпечення електроенергоефективності даних видів енергоємних споживачів електричної енергії;

- розробити методикy форматизації структури розбудови в складі загальношахтної «АСК електропостачання-електроспоживання» підсистеми автономного керування процесом відведення вод з підземних горизонтів залізорудних шахт;

- розробити методикy порівняльного аналізу електроенергоефективності функціонування водовідливних комплексів при варіативності алгоритмів їх функціонування.

Найсуттєвіші результати дослідження, отримані в роботі, містять наступну наукову новизну:

вперше:

- обґрунтовано, форматизовано і проведено оцінювання потенціально нового синергетичного виду електроенергетичної структури системи відведення вод з підземних горизонтів гірничорудних шахт, що дозволяє форматизувати цей найбільш енергоємний споживач електричної енергії даних видів підприємств у формат електроенергетичного комплексу: «споживач-регулятор-генератор електричної енергії» з отриманням значного рівня енергоефективності;

- визначено принципи формату методів оцінювання рівнів електроспоживання водовідливними комплексами залізорудних шахт і

диференційно оцінено вплив на цей процес технологічних параметрів конкретних підприємств. Побудована методологічна карта, яка враховує і комплексно інтегрує такі явища, як: моніторинг споживання електроенергії водовідливними комплексами залізорудної шахти з позиції системності; формування інформаційної бази щодо оцінювання співвідношення вартості та обсягів споживання електричної енергії цими видами споживачів електричної енергії; контроль за ходом і характером змін виконання планових завдань на рівні споживання електричної енергії водовідливними комплексами для реалізації стратегії підвищення електроенергоефективності залізорудних шахт;

– на основі ретроперспективного аналізу систематизовано та розширено існуючі кордони автоматизованого керування процесом відведення підземних вод як локального процесу в підпорядкуванні комплексу управлінських рішень автоматизованої системи керування електроенергетичним комплексом «енергопостачання-енергоспоживання» залізорудної шахти, що дозволить зменшити енергоємність видобуваємих копалин;

розглянуто:

– методи підходу до формування комплексного оцінювання електроспоживання водовідливними комплексами залізорудних шахт, які, на відміну від існуючих, орієнтовані на розвиток інформаційно-аналітичної підтримки процесу оптимізації споживання електроенергії, модифіковані відповідно до галузевих особливостей, враховують синергетичні ефекти, що дозволило визначити і врахувати специфіку досліджуваних процесів з конкретизацією стосовно саме специфіки технології залізорудних шахт;

набули подальшого розвитку:

– формування корпоративної системи моделей процесу електроспоживання складовими водовідливних комплексів на залізорудних шахтах, яка, на відміну від існуючих, враховує технологічні етапи видобутку залізної руди, що відбуваються на різних виробничих комплексах, як єдиного цілого в системі

«електропостачання-електроспоживання», що дозволяє оцінити електроенергоефективність як комплекс складових і вибрати напрямки її підвищення з урахуванням технологічних процесів;

– методичний підхід до прогнозування рівнів електроспоживання водовідливними установками залізорудних шахт на засадах екстраполяції та використання ідентифікації дискретних часових рядів, що дозволяє визначати прогнозні значення обсягів електроспоживання водовідливними установками;

– методи оцінювання ефективності застосування як окремих сегментів, так і всього енергетичного комплексу енергоємних виробництв на прикладі залізорудних підприємств із підземним способом видобутку залізорудної сировини.

Практичне значення отриманих результатів полягає у розробці методології зниження витрат електроенергії, а відповідно і вартісних показників щодо процесу відкачування води з підземних горизонтів залізорудних шахт. Одержані наукові результати, а саме: методологія підвищення енергоефективності комплексів водовідведення залізорудних шахт, впроваджено в ТОВ «НВК Криворіжелектромонтаж», що підтверджено актом про впровадження від 07.03.2021 р. Результати роботи також використовуються у Криворізькому національному університеті на кафедрі автоматизованих електромеханічних систем у промисловості та транспорті для підготовки фахівців за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», довідка про впровадження від 07.04.2022 р. (див. Додаток Д).

Особистий внесок здобувача. Основні наукові положення та результати дисертаційного дослідження виконані та отримані здобувачем самостійно. Особистий внесок здобувача в роботах, опублікованих у співавторстві, наступний:

В [1] розроблено методику, згідно якої проведено процедури експертних досліджень аналізу режимів споживання електричної енергії споживачами

залізорудних шахт взагалі та енергоємних зокрема. Запропоновано алгоритм формування та вибору входних параметрів, розроблено технологічну структуру функціонування «АСК електропостачання - електроспоживання» даних видів підприємств.

В [2] обґрунтовано та запропоновано методику та схему формату оцінювання рівня електроенергоефективності залізорудних шахт взагалі та комплексу водовідведення зокрема.

В [3] як доповнення до попередніх наукових робіт запропоновано варіативність переходу до структурування систем автоматизованого керування процесом водовідведення та оцінювання ефективності її функціонування згідно ряду технологічних параметрів функціонування залізорудних шахт.

В [4] обґрунтовано вибір та запропоновано варіант синергетичного системи електропостачання з втілення в її структуру пікових гідроакumuлюючих електростанцій на основі комплексу водовідведення залізорудних шахт.

В [5] запропонована методика оцінювання енергоекономічно орієнтованих варіантів системи керування синергетичною системою водовідливним комплексом шахт.

В [6] розроблено алгоритм керування та формалізація прийняття управлінських рішень «АСК електропостачання-електроспоживання».

В [7] запропоновано модель керування рівнями електропостачання залізорудних шахт в варіанті розподільчої генерації електроенергії.

В [8] синтезовано модель з урахуванням стохастичних характеристик процесу водовідливу, обсягів накопичення води і енергозатрат за визначений час.

В [9] обґрунтовано потенціальні можливості з підвищення енергоефективності залізорудних шахт шляхом створення пікових ГАЕС на основі водовідливних комплексів, визначено перелік заходів щодо практичної реалізації в розбудові ГАЕС.

В [10] запропоновано метод керування енергоємними споживачами електричної енергії залізорудних шахт.

В [11] обґрунтовано застосування енергоефективного варіанту керування електромеханічним комплексом.

В [12] зформовано загальні принципи пошуку та розбудови шляхів підвищення електроенергоефективності залізорудних підприємств.

В [13] побудовано математичну модель для оцінювання рівня енергоефективності шахт.

В [14] розроблено метод оцінювання енергоефективності варіантів функціонування структур ГАЕС в умовах залізорудних шахт.

Апробація матеріалів дисертації. Основні положення роботи та її результати доповідались, обговорювались та були схвалені на таких науково-технічних конференціях та семінарах:

- на Міжнародній науково-технічній конференції «Розвиток промисловості та суспільства», КНУ, м. Кривий Ріг, 2021 р.;

- на Second International Conference on Sustainable Futures “Environmental, Technological, Social and Economic Matters”, Kryvyi Rih, Ukraine, 19-21 May, 2021.

- на всеукраїнській науково-практичній конференції студентів та молодих учених «Актуальні питання енергоефективності гірничо-металургійного виробництва», КНУ, м. Кривий Ріг, 2022 р.;

- на The 3rd International Conference on Sustainable Futures “Environmental, Technological, Social and Economic Matters”. Kryvyi Rih, Ukraine, 24-27 May 2022. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.

Публікації. За матеріалами дисертаційної роботи опубліковано 14 робіт, з яких 1 монографія, 1 стаття у міжнародних періодичних виданнях, які внесені до міжнародної науково-метричної бази даних Scopus, 6 статей у наукових фахових виданнях, 1 стаття у науковому журналі, 5 – у матеріалах конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається із двох томів. Том 1 складається зі вступу, 4 розділів, списку використаних джерел, Том 2 – додатків. Загальний обсяг дисертації (Том 1) становить 188 сторінки, з яких основний зміст викладений на 145 сторінках друкованого тексту, містить 47 рисунків, 10 таблиць. Список використаних джерел складається з 142 найменувань. Додатки (Том 2) містять технічні та технологічні параметри водовідливних комплексів шахт України, статистику шахт, оцінки перспектив підвищення техніко-економічної ефективності шахтного водовідливу за допомогою накопичувачів енергії та з урахуванням змінного тарифу оплати електроенергії, економічні показники роботи системи електропостачання з розподіленою генерацією та акти впровадження результатів роботи.

РОЗДІЛ 1

ПРОЦЕС ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ-ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ ЗАЛІЗОРУДНИХ ПІДПРИЄМСТВ З ПІДЗЕМНИМ СПОСОБОМ ВИДОБУТКУ ЗАЛІЗОРУДНОЇ СИРОВИНИ. СТАН, ПРОБЛЕМИ, ЗАВДАННЯ.

1.1 Загальні питання електроенергетики та вплив на них технології функціонування ринку електричної енергії

Виробництво ЕЕ в Україні за останні десятиріччя зменшується і на початок 2020 року рівнялось 150000 ГВт год проти 300000 ГВт год 1990 року, тобто, факт скорочення в 2 рази. Між тим, рівні встановлених потужностей електростанцій в Україні порівняно з 1991 роком не зменшились, а, навпаки, зросли і на дійсний час дорівнюють близько 55 ГВт [55].

Потенціальні потужності української електроенергетики дають можливість виробляти близько 300 млрд. кВт год електричної енергії на рік.

Електробаланс України характеризується:

- зменшення з тенденцією потенціальної стабілізації обсягів за період 1990-2000 років виробництва ЕЕ з 298, 5 до 171,4 млрд. кВт год, тобто майже в 2 рази (в т.ч. ТЕС в 2,5 рази);
- зменшення обсягів отримання електричної енергії із-за меж України;
- зменшення обсягів споживання промисловою галуззю;
- зменшення відпущення електроенергії за межі держави;
- тенденцією стабільності обсягів виробництва ЕЕ;
- стабільність обсягів виробництва атомними електростанціями;
- зростання генеруючих потужностей.

В контексті сформованих світовою спільнотою ключових вимог до сучасної загальної енергетики, зокрема декларується її ефективність як

«максимізація ефективності використання всіх видів ресурсів і технологій при виробництві, передачі, розподілу та споживанні електроенергії» [56-62].

На даний період часу в більшості країн світу продовжується процес неухильного зменшення обсягів енергії, що використовується для виробництва одиниці ВВП. Ця тенденція, хоч і в значному відставанні від країн ЄС, характерна і для України. Як відомо [63], енергоємність цього головного економічного показника держави в значній мірі визначається частиною енергоємної промисловості. В останнє десятиріччя обсяги споживання ЕЕ промисловою галуззю України стабілізувалися. Близько до такого варіанту стабільності підійшли і енергоємні види виробництв, до яких, в першу чергу, відносяться підприємства гірничо-металургійного комплексу.

Така «стабільність» стримує необхідні для економіки держави темпи зменшення енергоємності ВВП. Однак це не вирок щодо безперспективності процесу подальшого зменшення енергоємності ВВП, а, навпаки, поштовх для активізації апробованих та пошуку нових шляхів для вирішення цієї глобальної для держави проблеми.

На вирішення цих задач спрямовано і Закон України про ринок електричної енергії [64].

Реформування ринку електроенергії України пов'язано з набуттям Україною статусу Договірної сторони у Договорі про заснування Енергетичного Співтовариства [65]. Виконання вимог Третього енергетичного пакету у встановлені терміни є головним пріоритетом для наступного періоду діяльності ОЕС України в рамках Енергетичного Співтовариства. Зокрема цим пакетом національний регулюючий орган наділено юридичною відокремленістю та функціональною незалежністю від будь-яких державних, громадських, приватних осіб, ринкових інтересів, включаючи осіб, відповідальних за управління.

Слід звернути увагу на те, що на основі досвіду зарубіжних країн реформування (лібералізація) ринків електроенергії з переходом до конкурентного ринку електроенергії, як правило, призводило до значного підвищення цін на електроенергію, зниження рівня інвестування в розвиток галузі з відповідним зниженням резерву потужності та надійності електропостачання споживачів.

Ряд вітчизняних вчених-електроенергетиків [57-63] наголошують, що на даному етапі розвитку законодавства, зокрема антимонопольного, доцільніше не змінювати «діючу» модель ринку електроенергії, а удосконалювати її шляхом запровадження механізмів централізованого впливу на розвиток та функціонування ОЕС України. Також доведено, що концентрація ринкової влади перш за все у виробництві електроенергії (монополізація генерації) певною фінансово-промисловою групою суперечить ідеї щодо формування ринкової конкуренції, яка лежить в основі «нової» моделі функціонування та організації роботи енергоринку.

Як свідчать результати вже перших років реформ нова, як вже існуюча, модель оптового енергетичного ринку України потребує удосконалення в частині дотримання як економічних інтересів постачальників, так і споживачів електричної енергії. Важливою складовою цього процесу повинна стати оптимізація вартості електроенергії. Кожен виробник і постачальник повинен відповідати як за власний баланс, так і за небаланс ЕЕ, тобто відхилення від договірної графіку виробництва або споживання.

Укладаючи двосторонні контракти або купуючи електроенергію на ринку на добу вперед, енергопостачальники і виробники зобов'язані забезпечити своє споживання і виробництво в певні години на відповідному рівні. При цьому вони є сторонами, що є відповідальними за баланс особисто (або входять на договірній основі в певну балансуєчу групу).

Базовими споживачами ЕЕ в Україні є гірничо-металургійні підприємства кількість яких становить біля 200-т. Дані види підприємств України вже більше 3-х років працюють в умовах ринку електроенергії [64]. Для переходу в такий формат підприємствам-споживачам ЕЕ необхідно було виконати значний обсяг роботи по удосконаленню звітних форм автоматизованої системи енергообліку, проведенню організаційних заходів щодо роботи енергослужб.

До січня 2019 року на промислових, в т. ч. гірничорудних, підприємствах використовувалися тризонні тарифи – «пік», «напівпік» і «ніч». Вартість електроенергії, наприклад, у квітні 2019 року в зоні «пік» складала 2,94 грн, в зоні «напівпік» – 1,67 грн, в зоні «ніч» – 0,41 грн. Підприємства мали можливість ефективно використовувати роботу водовідливних і підйомних установок в нічний час, тому економили кошти на оплату електроенергії через відмінність більш ніж у сім разів вартості зон «пік» і «ніч». Це позитивно впливало і на роботу енергокомпаній через розвантаження зон «пік», оскільки в цих зонах енергоємні споживачі майже не працювали.

З переходом на енергоринок почали діяти погодинні добові, а по факту двозонні тарифи – «день» і «ніч», які різняться між собою близько в 2 рази, наприклад, у квітні 2020 року вартість в зоні «день» складала 2,05 грн, в зоні «ніч» – 0,96 грн. Тепер підприємства не використовують паузи в ранкові і вечірні пікові години, тому зростає навантаження в ці години для енергокомпаній.

Якщо раніш тарифи на електроенергію для підприємств постійно та стабільно тільки зростали, то тепер ринок визначає рівні вартості електроенергії. Тому є сподівання, що коли ринок в Україні буде надійно функціонувати, то він буде позитивно впливати як на енергокомпанії, так і на споживачів електроенергії. Але для досягнення такого паритету необхідно підходити зважено з обох зацікавлених сторін на основі результатів наукових пошуків шляхів до цього.

Водночас слід пам'ятати, що базують формуючою складовою варіативності і електроекономіки як генеруючих систем, так і споживачів ЕЕ є форми графіків споживання електроенергії [34, 37, 39, 66]. Ці графіки диференціюються як добові, місячні, сезонні та річні. Від траєкторії графіків споживання ЕЕ енергоємними підприємствами залежать відповідні графіки генеруючих систем, тому процес впливу на їх форму в наближенні до оптимального вигляду треба починати з самих споживачів електричної енергії. Як встановлено [38, 41, 42], найбільшими коливаннями в порівнянні з іншими промисловими підприємствами відрізняються залізничні підприємства.

Особливо ця динаміка коливань притаманна добовим режимам споживання ЕЕ. Враховуючи, що згідно Закону України [64] тарифи на споживання ЕЕ визначаються енергоринком погодинно на добу наперед, то і спрямування шляхів вирішення проблеми підвищення енергоефективності гірничовидобувних підприємств (як і інших видів споживачів) повинні вибиратись саме в цьому ракурсі.

Разом з вищевикладеними аргументами згідно стану та перспектив енергетики України взагалі та електроенергетики в тому числі, слід зазначити такий системоутворюючий факт сучасності як надійність та безперебійність функціонування систем енергоживлення промислових підприємств та підприємств житлово-комунального господарства держави в екстремальних ситуаціях. Для цього необхідний пошук, обґрунтування та розробка конкретних заходів щодо забезпечення стійкості та безперервності функціонування систем електропостачання в тому числі шляхом створення автономних (резервних) систем генерації ЕЕ на підприємствах, місцях проживання тощо.

1.2 Аналіз поточного стану процесу постачання та споживання електричної енергії гірничорудними підприємствами з підземним способами видобутку залізорудної сировини *

Як зазначалось в попередньому розділі даного дослідження залізорудні підприємства взагалі та з підземними способами видобутку ЗРС зокрема, є потужними споживачами електроенергії. Як приклад, місячні об'єми спожитої електроенергії шахтами вітчизняними гірничими підприємствами з підземними способами видобутку ЗРС (шахти, рудники) складають близько 22 – 26 млн. кВт·год. В зв'язку з цим ці види залізорудних підприємств, доречі як і всі інші гірничовидобувні, є споживачами, які поряд з іншими енергоємними виробництвами визначають споживчі обсяги електроенергії, графіки споживаної потужності і ступінь впливу на якість електроенергії в мережах електропостачання. Стосовно внутрішніх СЕП (рис. 1.1) гірничовидобувних підприємств то тут серед інших домінує критерій необхідного рівня безперебійності та надійності електропостачання, оскільки більшість споживачів ЕЕ цих підприємств згідно необхідності забезпечення надійності електропостачання відносяться до 1-ї категорії [66].

Серед електроприймачів 1-ї категорії, від яких залежить надійність, безпека і ефективність роботи гірничого підприємства, одне з головних місць належить так званим стаціонарним установкам (комплексам). Ці приймачі ЕЕ характеризуються складністю конструкцій і значним рівнем енергоємності (на їх частку доводиться більше 80 % всієї споживаної даними видами гірничих підприємств електроенергії). Стаціонарні установки є комплексами зі складним енергомеханічним устаткуванням і призначені для підйому корисних копалин

* При структуруванні змісту розділу використані результати експериментальних досліджень отриманих як безпосередньо автором, такі ті, що були накопичені в ході багаточисленного наукового пошуку на протязі 1999-2021 років в умовах діючих залізорудних шахт України та котрі були люб'язно надані автору для подальшої їх форматизації членами наукової школи під керівництвом д-ра техн. наук, професора Сінчука О.М.

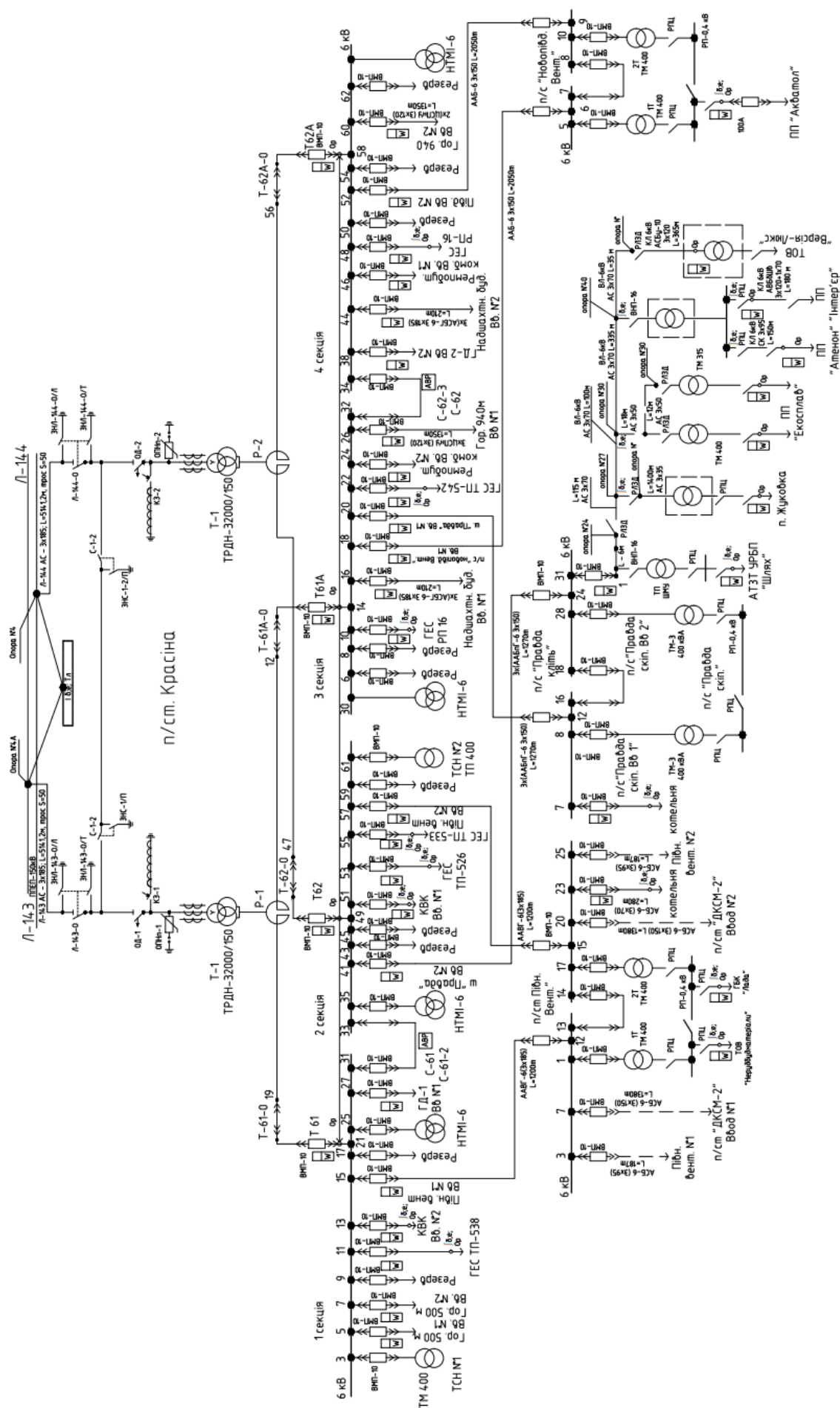


Рисунок 1.1 – Внутрішні системи електропостачання залізорудних шахт

і порожніх порід на поверхню (скіпові підймальні установки), підйому і спуску людей, матеріалів, устаткування (клітьові підймальні установки); відкачування води з підземних гірничих виробок на поверхню (водовідливні комплекси); штучного провітрювання гірничих виробок і створення нормальних атмосферних умов для роботи гірників (вентилятори головного провітрювання); виробництво пневматичної енергії – енергії стислого повітря, використовуваної при роботі гірничих комбайнів, відбійних і бурильних молотків, лебідок (компресорні установки), вентиляторів місцевого провітрювання, дільничних насосів та інші. Саме стаціонарні установки формують рівні і режими загального споживання ЕЕ підземними залізрудними підприємствами.

Між тим, як видно з наведених матеріалів табл. 1.1, споживання даного виду енергії на окремих залізрудних шахтах відрізняються між собою. Це залежить від багатьох факторів: об'ємів видобутку ЗРС, діючих глибин видобутку, об'ємів надходження ґрунтових вод, розгалуженості підземних горизонтів тощо [67].

В табл. 1.1 наведені дані з питомого енергоспоживання окремих вітчизняних залізрудних шахт. Представлені дані підтверджують попередній висновок.

В сучасному форматі функціонування гірничих підприємств для формування собівартості видобутку ЗРС та відповідних заявок на енергоринок України, згідно існуючих методик залізрудні підприємства визначають контрольні цифри для своїх структурних підрозділів на добові погодинні рівні споживання ЕЕ.

На рис.1.2, як приклад, представлені реальні графіки планового та фактичного споживання електроенергії окремих вітчизняних залізрудних шахт.

Таблиця 1.1 – Показники споживання електроенергії і її вартості по залізорудним шахтам України (грудень 2020 р.)

Шахти	Спожи- вання ЕЕ, тис. кВт·год	Питома частка енерго- споживання, %	Обсяги сплати за спожиту ЕЕ, тис. грн.	Питома частка сплати за ЕЕ, %	Питома вартість, грн/ кВт·год
ш. Покровська (м. Кривий Ріг)	3871,095	14,40	3510,437	13,04	0,90683
ш. Криворізька (м. Кривий Ріг)	6014,121	22,38	5541,670	20,59	0,92144
ш. Козацька (м. Кривий Ріг)	3919,249	14,58	4263,806	15,84	1,08791
ш. Тернівська (м. Кривий Ріг)	3522,988	13,11	3291,708	12,23	0,93435
ш. ім. Фрунзе (м. Кривий Ріг)	4104,824	15,27	4620,472	14,81	1,12562
ш. Ювілейна (м. Кривий Ріг)	5073,224	15,12	4793,081	14,62	0,94478
ш. ім. Артема (м. Кривий Ріг)	4576,334	16,78	4510,298	14,95	0,98557
ш. Гігант-Глибока (законсервована) (м. Кривий Ріг)	3376,675	89,23	3844,850	88,45	1,13865
ш. Експлуатаційна (м. Дніпрорудне)	3567,732	14,94	3729,671	13,64	1,04539



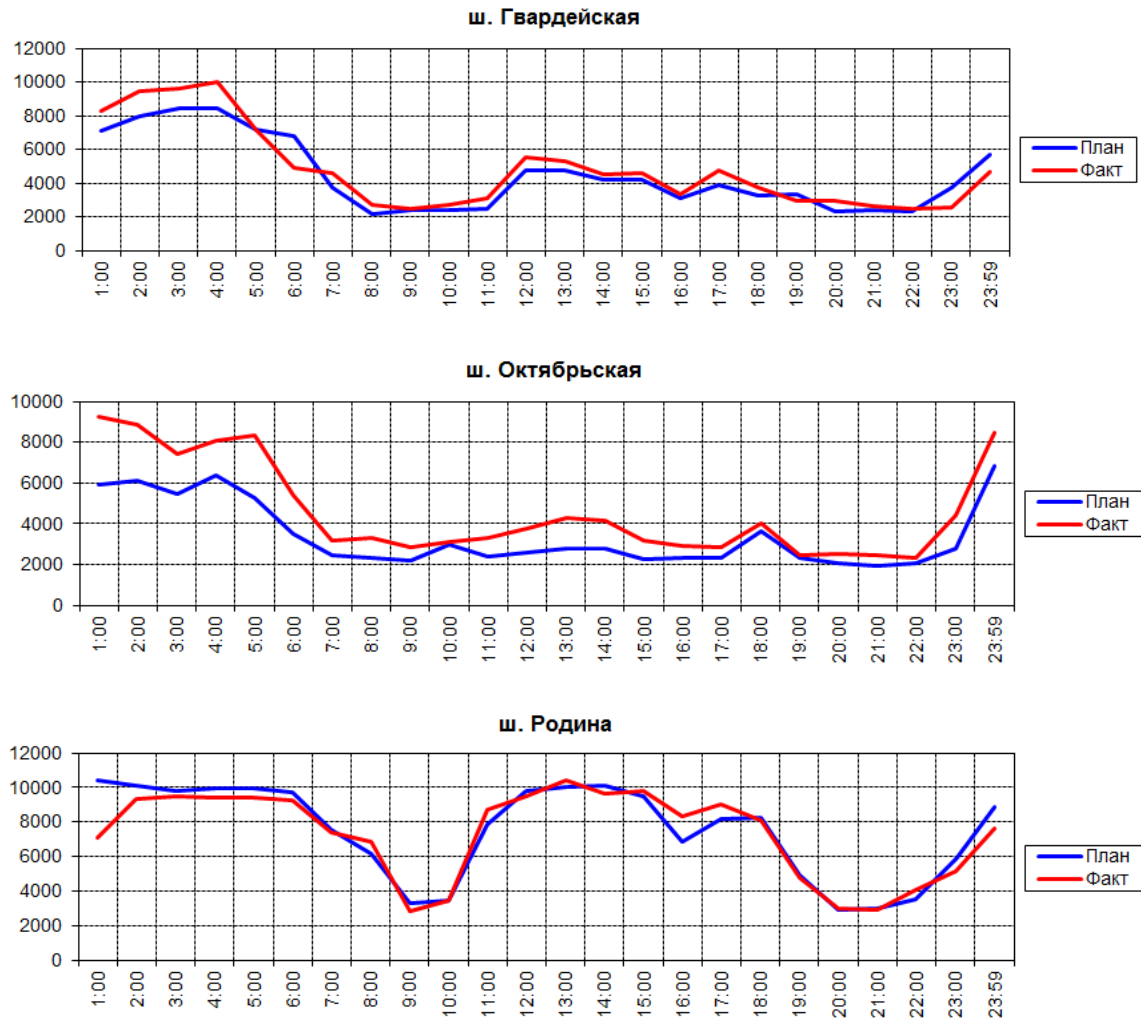


Рисунок 1.2 – Графіки планового і фактичного споживання активної електроенергії на разі залізрудних шахт України (25.09.2020 р.)

Висновок з графіків план-факт (рис. 1.2) споживання ЕЕ різняться. При цьому рівень невідповідності по кожній шахті індивідуальний, проте стабільність збільшення як запланованих, так і фактичних рівнів споживання електроенергії має місце і в нічний період часу і в денний.

Проте цікавим для подальшого аналізу вбачається диференційоване оцінювання процесу споживання ЕЕ залізрудних підприємств по видам споживачів.

На рис. 1.3 наведена діаграма упосередненого розподілу електроенергії між структурними підрозділами вітчизняних залізрудних шахт (без компресорних установок энергоцеху).

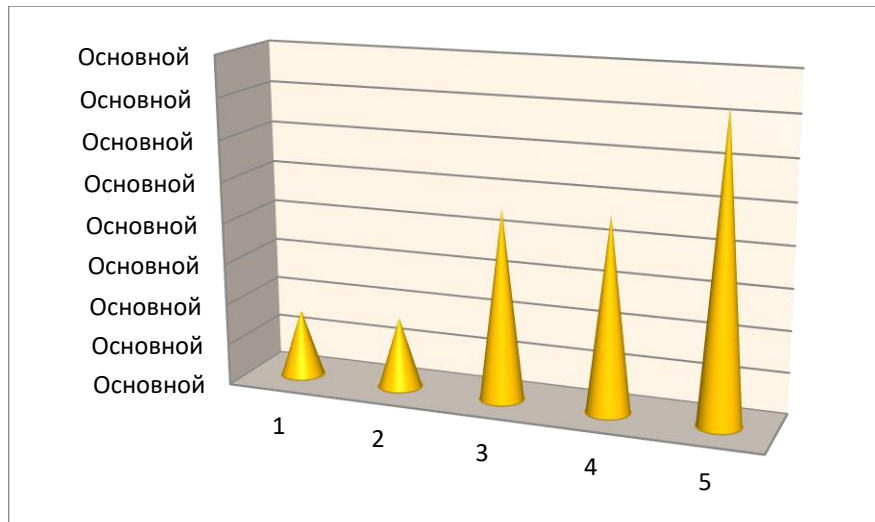


Рисунок 3 – Усереднений за 2016 - 2021 роки розподіл рівнів споживання електричної енергії між енергоємними споживачами при підземному (шахтному) способі видобутку залізрудної сировини: 1 – інші; 2 – ДСФ; 3 – вентиляція; 4 – скіповий підйом; 5 – водовідлив

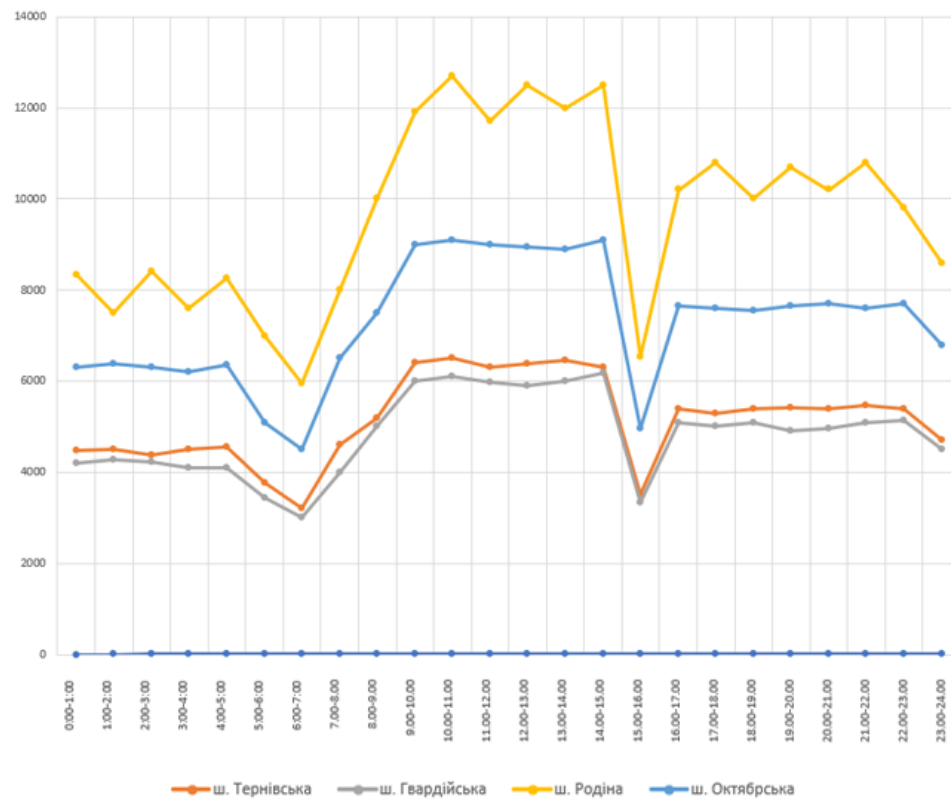
Як видно з наведеної діаграми сумарне енергоспоживання скіпових підйомних установок, водовідливних і вентиляційних установок складає більше 90 %*.

До інших споживачів відносяться поверхові і підземні споживачі (клітьові підйомні установки, компресорні установки, дозатори, дробарки, електропотяги)*.

Між ти по кожній окремо взятій шахті рівні споживання ЕЕ вищезазначеними енергоємними приймачами різняться в рівнях своїх коливань (рис. 1.4).

* В наведеній діаграмі не враховано енергоспоживання потужних компресорних станцій, яке виділено в окремий структурний підрозділ - энергоцех, і кожна компресорна станція може обслуговувати 1-3 шахти стисненим повітрям.

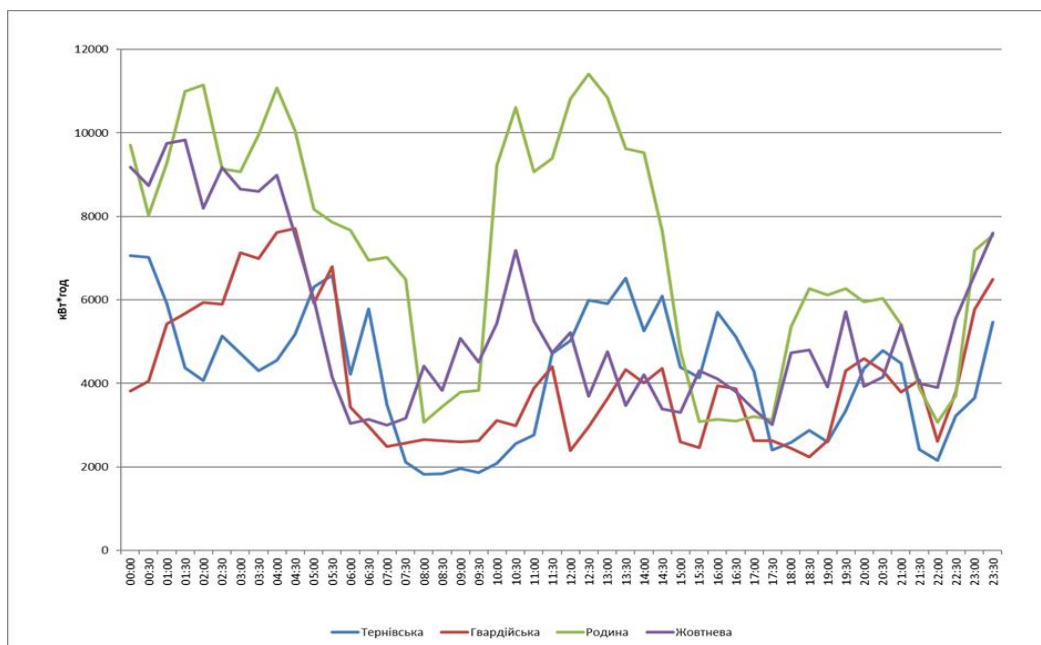
Це результат того, що на режим споживання ЕЕ окремими стаціонарними установками впливає технологічна індивідуальність конкретної залізорудної шахти [12, 22, 23, 67]. Така ситуація унеможливорює формування єдиного узагальненого алгоритму керування режимами електроспоживання для всіх суб'єктів – шахт. Ця теза стосується і тих шахт, котрі об'єднані в єдину технологічну структуру комбінатів, концернів і т.п. І це повинно враховуватись при розбудові алгоритму керування енергоспоживання тієї чи іншої конкретної шахти.



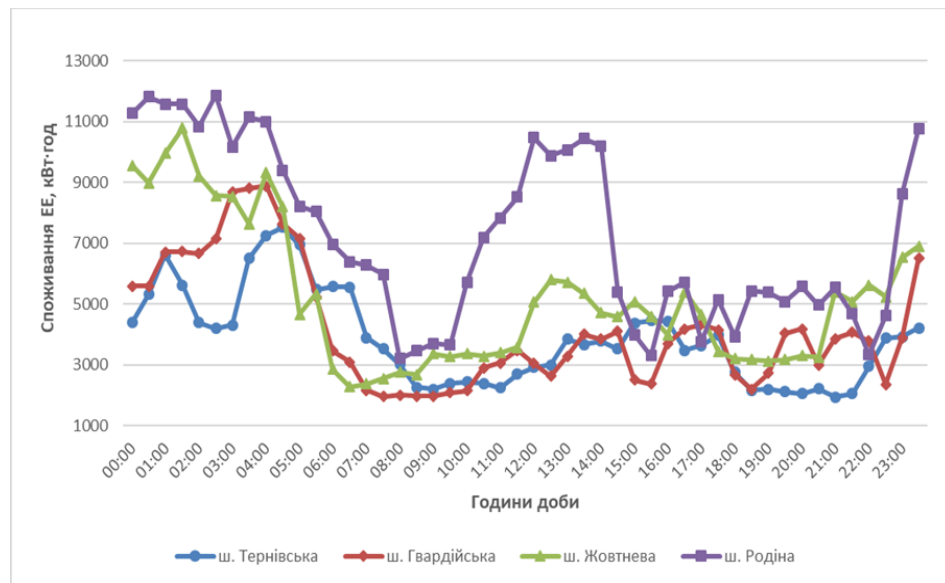
а)



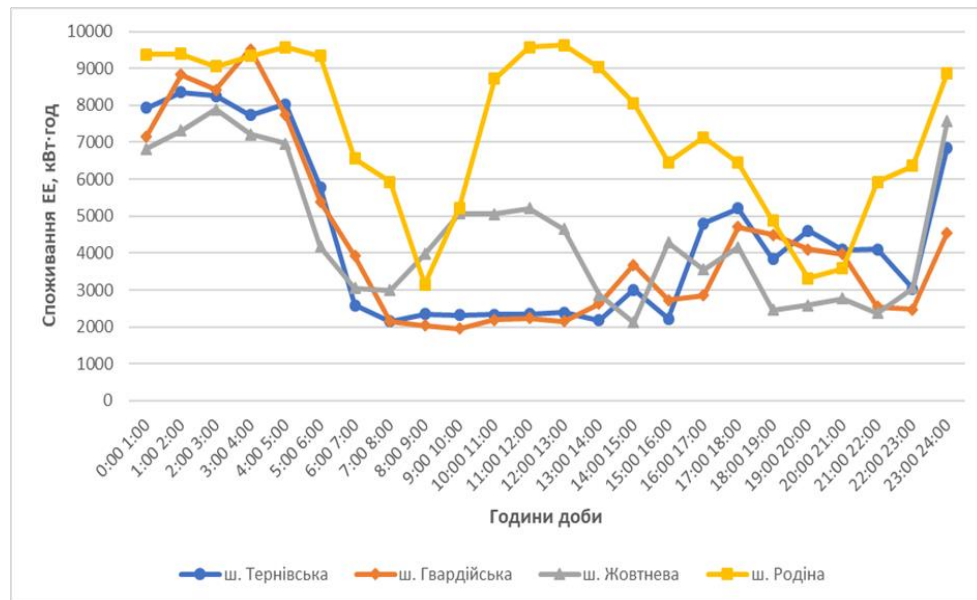
б)



в)



г)



д)

Рисунок 1.4 – Споживання електроенергії рядом залізрудних шахт Криворізького басейну: а) 23 квітня 1999 р.; б) р.23 квітня 2012 р.; в) 23 квітня 2013 р.; г) 23 квітня 2015 р.; д) 23 квітня 2020 р.

Як відомо до 2019 року вітчизняними шахтами, як і іншими видами промислових підприємств для розрахунків за спожиту електроенергію

використовувався тризонний тариф, який стимулював підприємство максимально працювати в нічний час і розвантажувати споживання електроенергії в пікові години – вранці і ввечері. Оскільки такий режим був доступним по технологічним умовам, то виграші були і підприємство і енергокомпанія: підприємство менше витрачало коштів на електроенергію і енергокомпанія мала більш стабільний графік споживання електроенергії через компенсацію збільшення електроенергії міськими електромережами в пікові години.

Перехід з 2019 року на умови енергоринку і впровадження плаваючих погодинних тарифів призвело до того, що підприємства зменшили час роботи в позапікові години, а це, в свою чергу, зменшило нерівномірність споживання електроенергії від енергокомпаній. На рис. 1.5 – 1.12 наведені добові графіки споживання ЕЕ при роботі скіпових підйомів, ДСФ, вентиляції і водовідливів 4-х залізрудних шахт до і після введення ринку електроенергії.

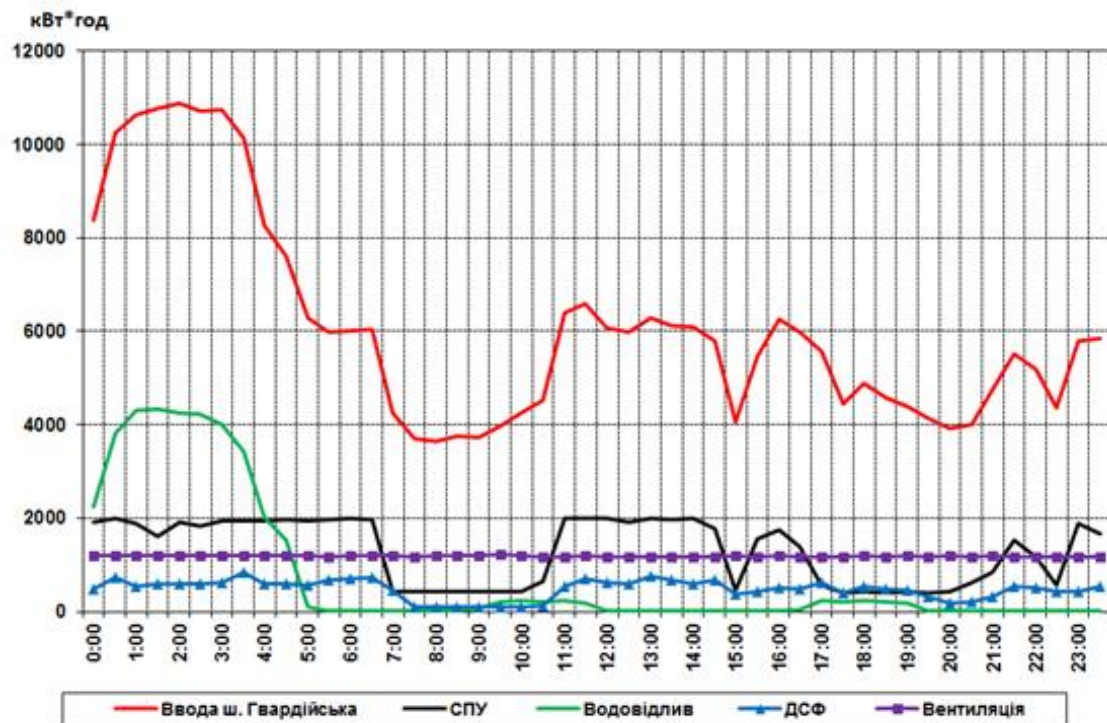


Рисунок 1.5 – Добовий графік споживання електроенергії ш. Козацька (м. Кривий Ріг) 25.11.2018 (до введення енергоринку)

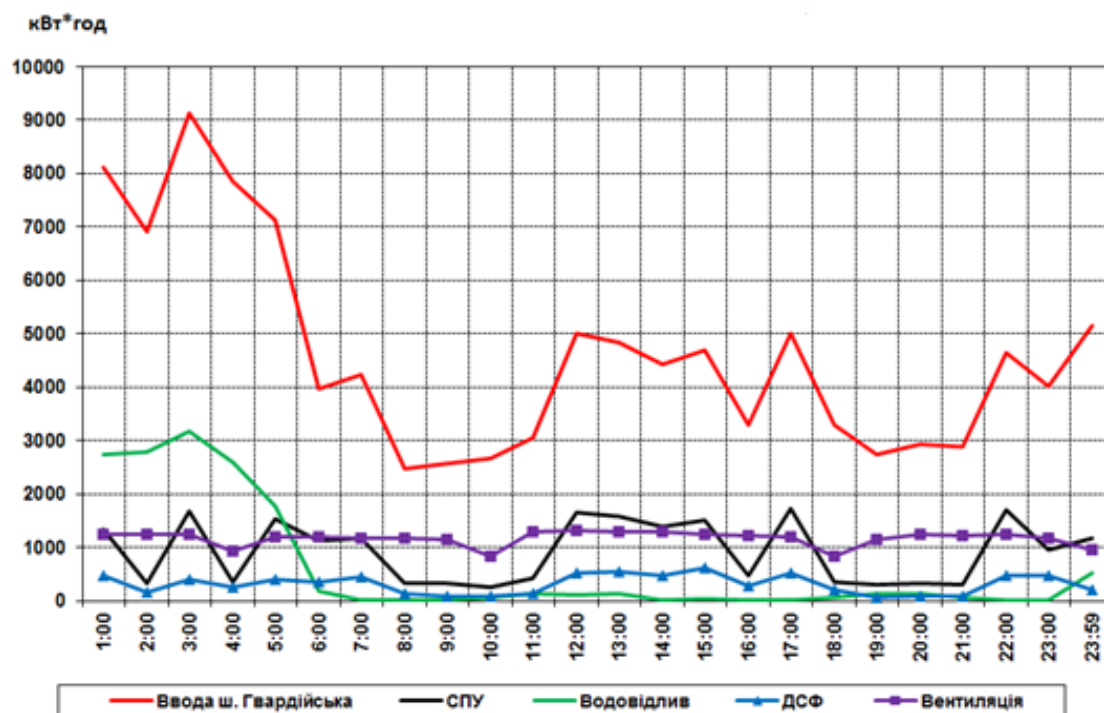


Рисунок 1.6 – Добовий графік споживання електроенергії ш. Козацька
(м. Кривий Ріг) 08.10.2019 (після введення енергоринку)

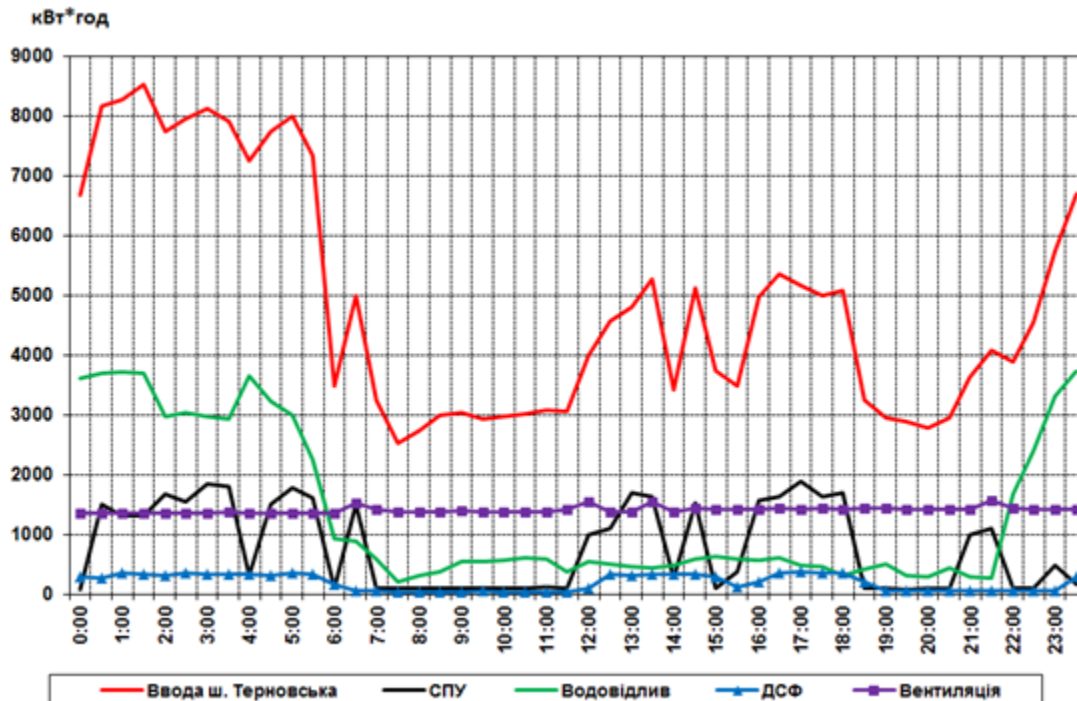


Рисунок 1.7 – Добовий графік споживання електроенергії ш. Тернівська
(м. Кривий Ріг) 25.11.2018 (до введення енергоринку)

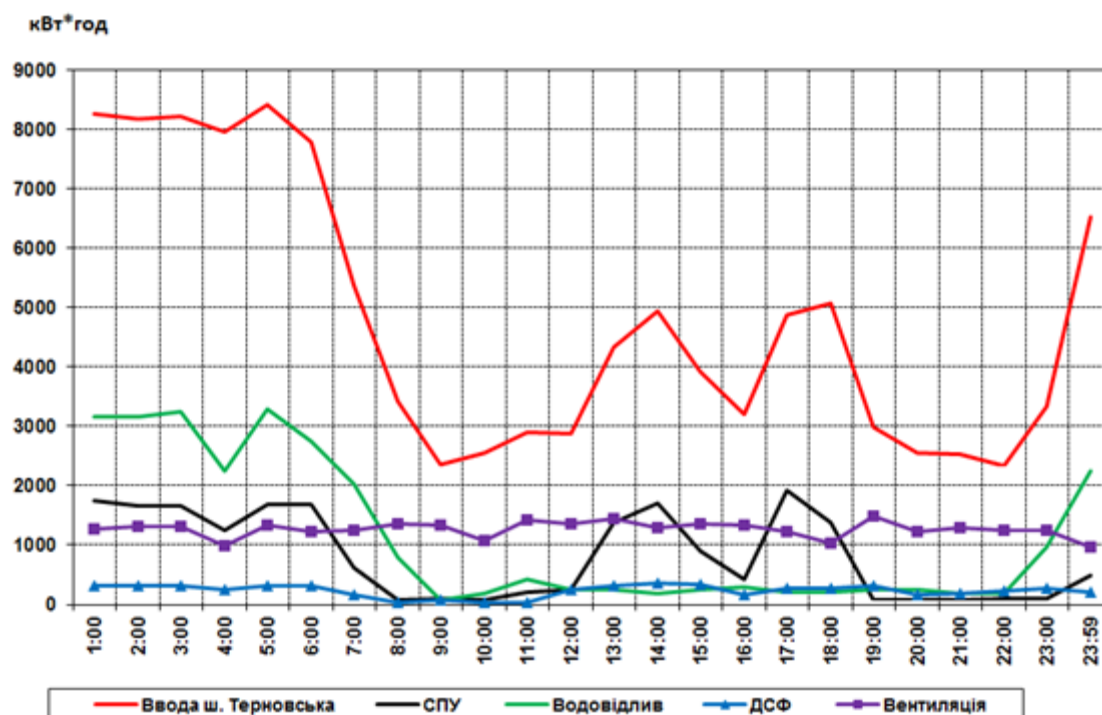


Рисунок 1.8 – Добовий графік споживання електроенергії ш. Тернівська (м. Кривий Ріг) 08.10.2019 (після введення енергоринку)

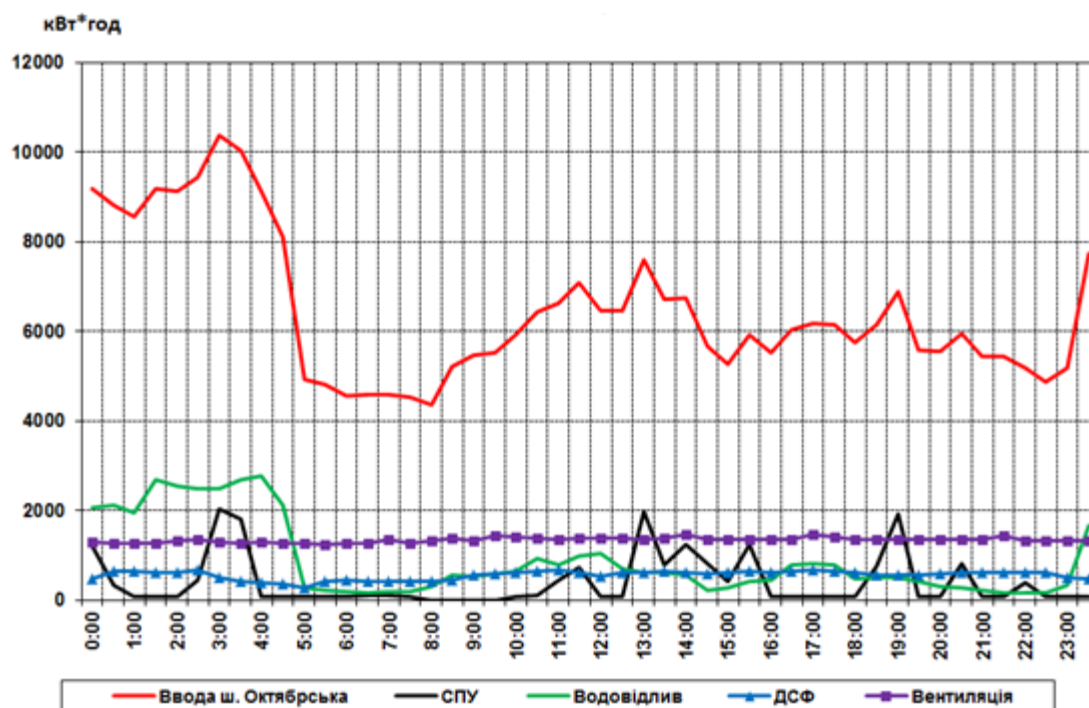


Рисунок 1.9 – Добовий графік споживання електроенергії ш. Покровська (м. Кривий Ріг) 25.11.2018 (до введення енергоринку)

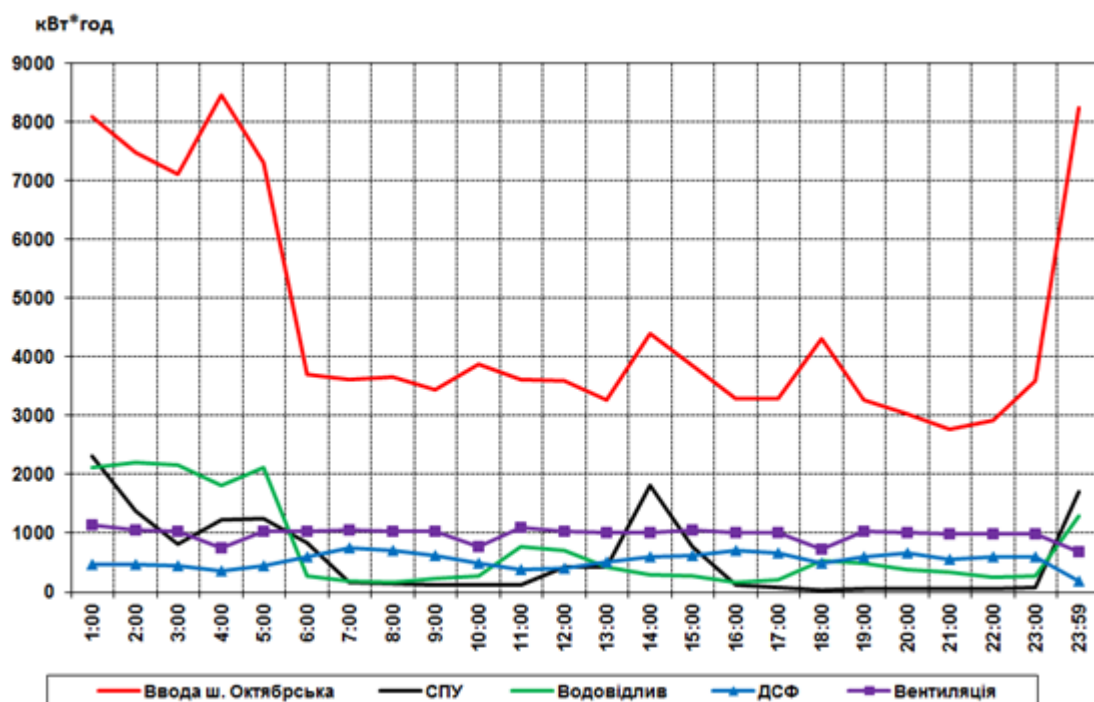


Рисунок 1.10 – Добовий графік споживання електроенергії ш. Покровська (м. Кривий Ріг) 08.10.2019 (після введення енергоринку)

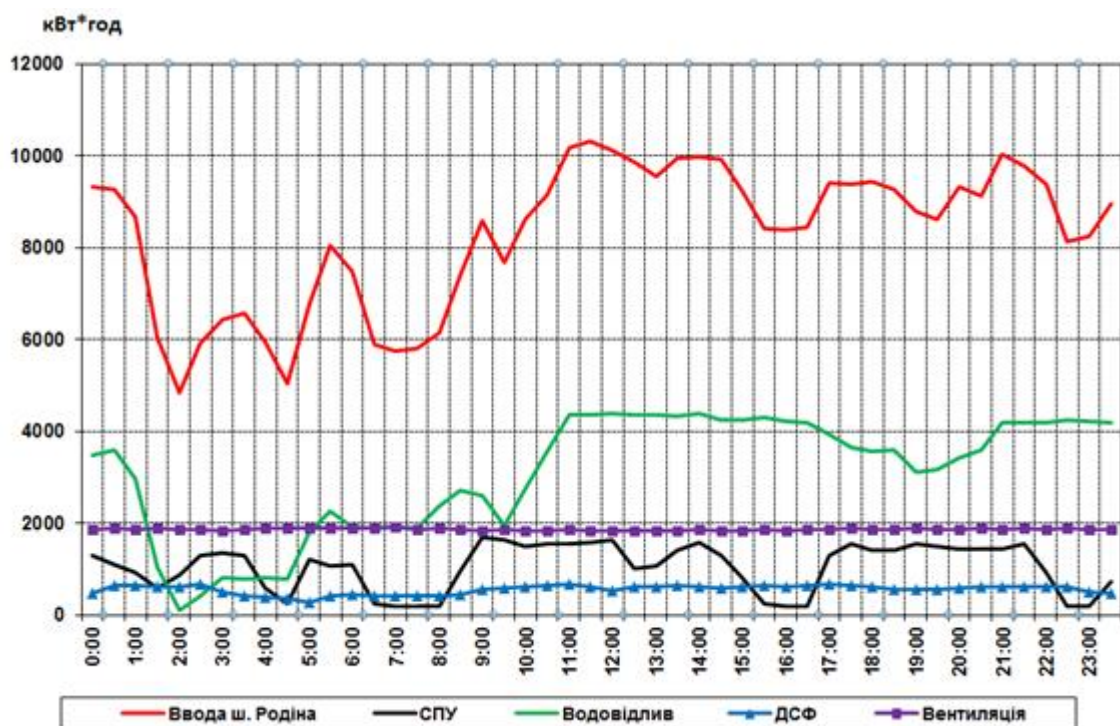


Рисунок 1.11 – Добовий графік споживання активної потужності ш. Криворізька (м. Кривий Ріг) 25.11.2018 (до введення енергоринку)

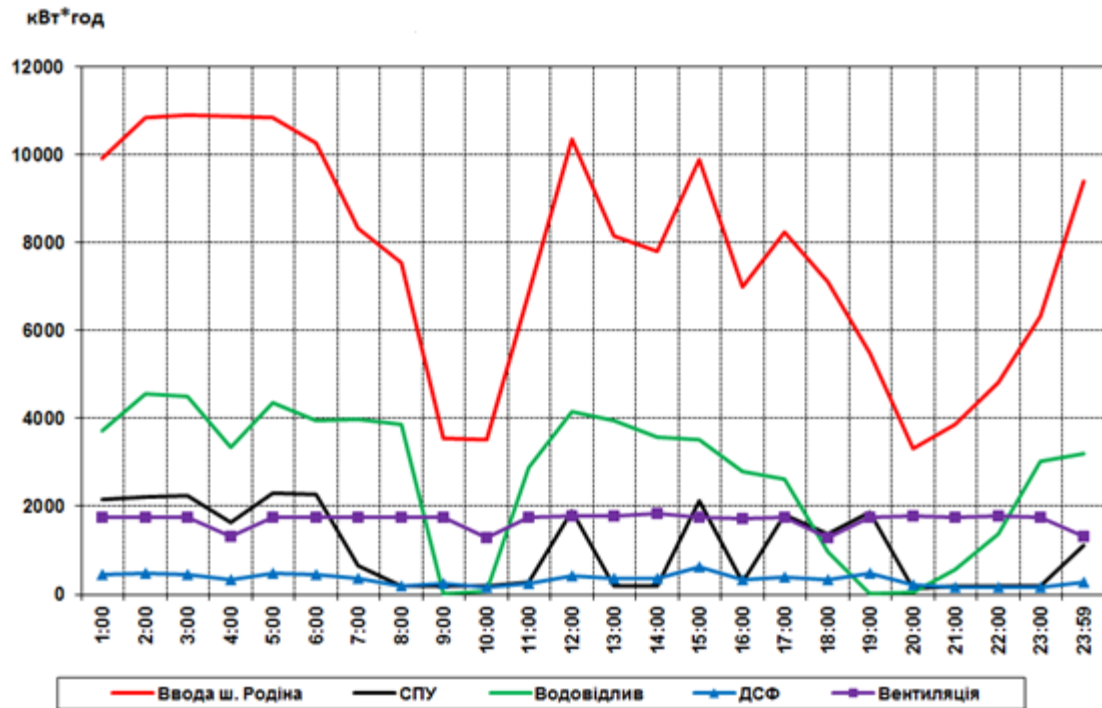


Рисунок 1.12 – Добовий графік споживання електроенергії ш. Криворізька (м. Кривий Ріг) 08.10.2019 (після введення енергоринку)

Аналіз наведених графіків показує, що графіки за 2018 рік мають дискретність 30 хвилин, тоді як графіки за 2019 рік – 1 годину. Через це графіки 2018 року більш інформативні і показують більш точно динаміку зміни енергоспоживання в часі. Також в графіках за 2019 рік можна спостерігати зменшення рівнів енергоспоживання всіх споживачів.

Аналіз електроенергоспоживання ш. Козацька (м. Кривий Ріг) показує, що у 2019 році спостерігається зменшення рівнів споживання електроенергії по ряду споживачів в т. ч. і на водовідведення. Це пов'язано з оптимізацією роботи електрообладнання стаціонарних установок.

В 2018 році водовідливні установки працювали в нічний час з 0:30 до 4:30, а в 2019 році – з 23:00 до 5:30. Таке збільшення періоду відкачування шахтної води за рахунок кількості працюючих насосів дозволяє зменшити максимальні

амплітуди споживання електроенергії в нічний час, що обмежує коливання напруги шахтної електромережі.

З наведених графіків можна зробити висновки, що як рівні споживання, так і динаміка графіків загального споживання електроенергії шахтою з мережі електропостачання визначається динамікою споживанням шахтних скіпових підйомних установок і шахтних водовідливних установок.

Більше того, природний процес постійного поглиблення залізрудних шахт призводить до відповідного збільшення обсягів енергоспоживання цими споживачами, що викликане збільшенням відстані підйому на поверхню ЗРС і шахтних вод, зміною гірничо-геологічних умов (відпрацювання більш глибоких горизонтів, протяжність транспортних виробок тощо), що тягне за собою збільшені витрати електроенергії.

Це в черговий раз підкреслює актуальність досліджень процесу електропостачання-електроспоживання даних видів підприємств з послідовними висновками для переведення цього процесу в сферу економічноорієнтованого спрямування.

1.3 Аналіз технологічних та електроенергетичних параметрів при відведенні підземних вод з виробок залізрудних шахт

Як зазначено в розділі 1.2 даного дослідження одним з найбільших по рівню споживання ЕЕ залізрудних шахт є їх водовідливні комплекси.

Видалення води з гірничих виробок здійснюється за допомогою спеціального обладнання – водовідливних комплексів (установок) [68, 69] (Додаток А).

Залежно від глибини шахти та кількості горизонтів, на яких ведуться гірничі роботи, можливі дві основні гідравлічні схеми головного водовідливу – пряма відкачка води на поверхню та ступенева схема з перекачкою води із нижче-

розташованого горизонту на верхній [70-77]. При такій ступеневій схемі насоси кожного горизонту кожної шахти працюють незалежно один від одного (рис. 1.13).

В деяких умовах може бути доцільною інша – ступенева схема головного водовідливу, при якій насос вище розташованого горизонту підключається послідовно до нижче розташованого насоса (рис. 1.14). В абсолютній більшості випадків насоси в насосних камерах розміщуються вище рівня води у водозбірниках, хоча інколи вони розташовуються нижче цього рівня.

В табл. 1.2 та Додатку А представлені дані за добовими витратами електроенергії водовідливних комплексів залізорудних шахт.

Таблиця 1.2 – Добове споживання електроенергії водовідливними комплексами залізорудних шахт України

Шахти	Добова електроенергія, кВт·год		
	День	Ніч	Всього
ш. Покровська (м. Кривий Ріг)	41091	34030	75121
ш. Криворізька (м. Кривий Ріг)	13712	14215	27927
ш. Козацька (м. Кривий Ріг)	1458	25537	26995
ш. Тернівська (м. Кривий Ріг)	13446	17322	30768
ш. ім. Фрунзе (м. Кривий Ріг)	2407	15247	17654
ш. Ювілейна (м. Кривий Ріг)	6884	24405	31289
ш. ім. Артема (м. Кривий Ріг)	5832	17496	23328
ш. Гігант-Глибока (законсервована) (м. Кривий Ріг)	15967	29653	45620
ш. Експлуатаційна (м. Дніпрорудне)	7221	37884	45105

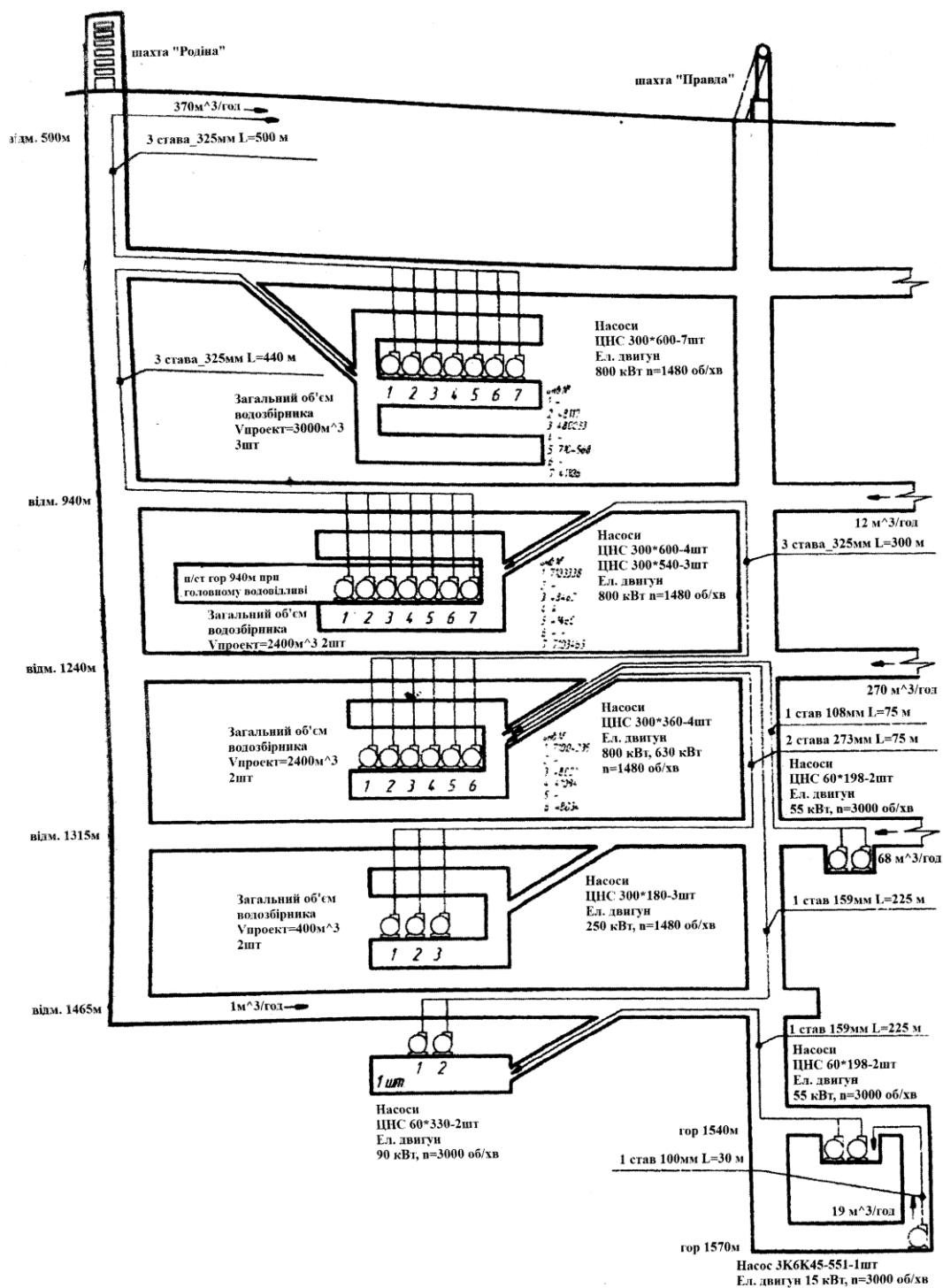


Рисунок 1.13 – Структура відкачування води водовідливними установками об'єднаного комплексу водовідведення шахт «Криворізька» та «Правда» (м. Кривий Ріг)

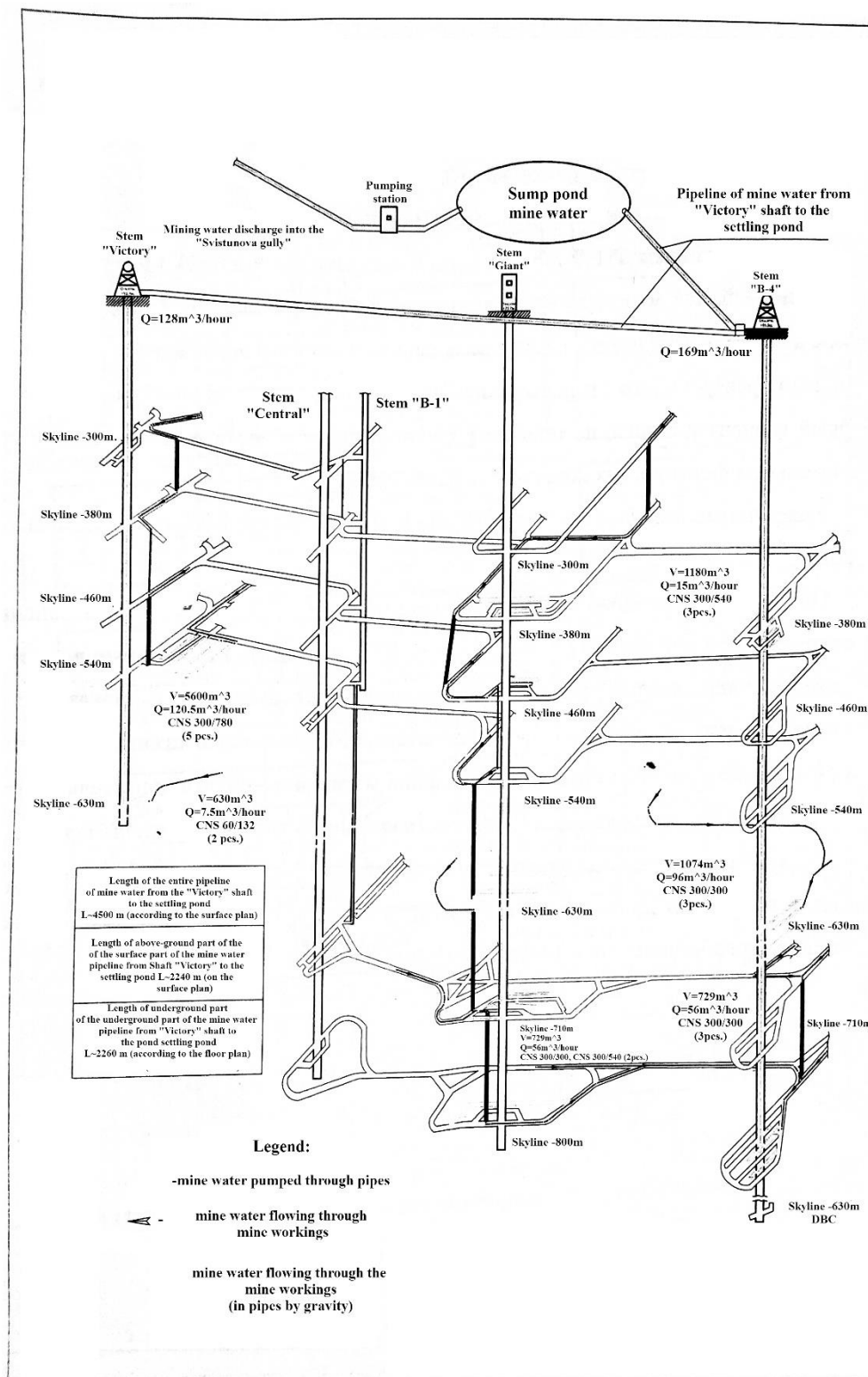


Рисунок 1.14 – Структура відкачування води водовідливними установками законсервованої ш. Гігант-Глибока (м. Кривий Ріг)

Аналіз наведених даних в табл. 1.2 показує, що питома витрата електроенергії на відкачування води коливається в діапазоні 6,2 - 7,2 кВт·год/м.

Шахти, які виведені з експлуатації і забезпечують відкачування шахтних вод, щоб не допустити підтоплення земель, також споживають електроенергію для водовідливних установок. Представником такої непрацюючої шахти у Кривбасі є шахта «Гігант-Глибока», графіки енергоспоживання якої за роками з 2013 по 2020 рік, наведені на рис. 1.15. Середньодобове споживання електроенергії ш. «Гігант-Глибока» складає від 43200 до 55000 кВт·год, що дає в розрахунку добовий водоприплив від 6170 до 7800 м³. Можна бачити, що відкачування шахтної води відбувається як в нічний, так і в денний час. На коливання енергоспоживання накладаються збурення, пов'язані з роботою клітьового підйому зі спуском-підйомом обслуговуючого персоналу.

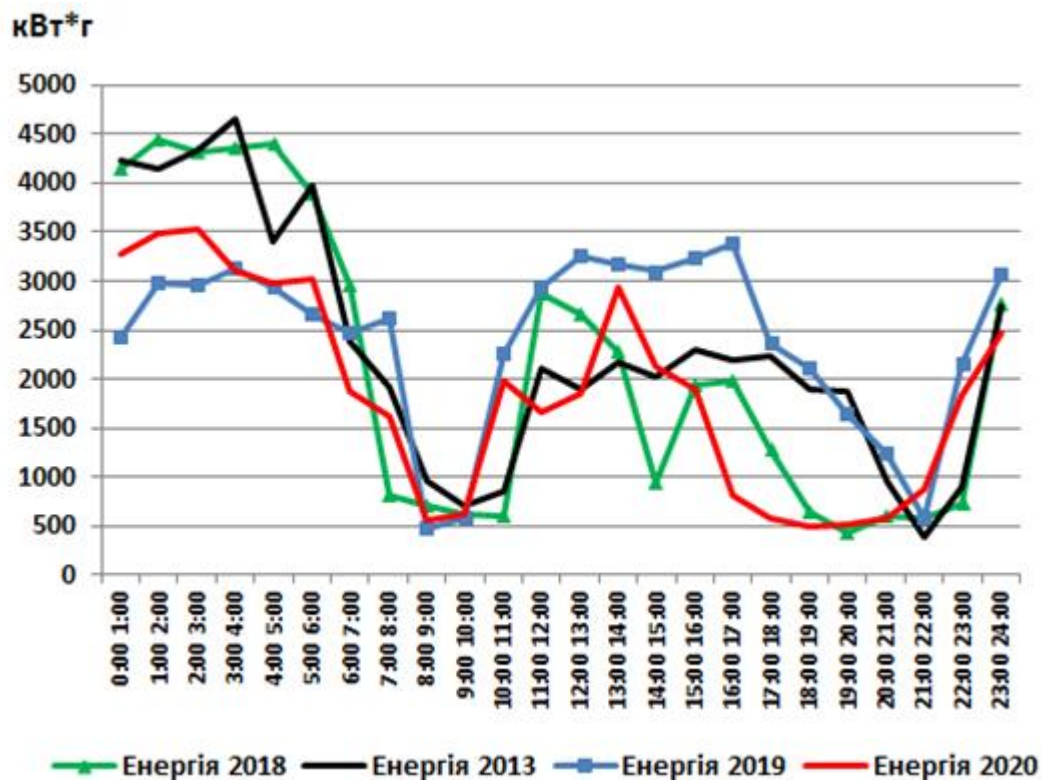


Рисунок 1.15 – Добові графіки споживання електроенергії законсервованої ш. Гігант-Глибока (м. Кривий Ріг) впродовж 2013-2020 р

Як видно з графіків, з року в рік спостерігається певна синхронність впродовж доби коливань рівнів споживання електроенергії. Це в черговий раз підкреслює можливості керування цим процесом у стані «споживач-регулятор».

Якщо для непрацюючої шахти проблема енергоефективності відкачування води є одновекторною в своєму вирішенні – години доби без урахування інших технологічних факторів впливу в функції часу підземних гірничих робіт, то на діючих шахтах це багатовекторна задача, в постанові рішення котрої має місце невизначеність і непостійність ряду вхідних параметрів.

Між тим, весь технологічний синтез систем водовідведення як «працюючих» так і «непрацюючих» шахт функціонує в єдиній гідроенергетичній структурі.

В табл. 1.3 наведено дані по водовідливним комплексам ряду залізорудних шахт України.

Таблиця 1.3 – Характеристика водовідливів шахт

Шахти	Добовий водоприплив, м ³	Питомий водоприплив, м ³ /год	Обсяг водозбірника, м ³
ш. Криворізька (м. Кривий Ріг)	11429	476	26600
ш. Покровська (м. Кривий Ріг)	3112	129	20080
ш. Козацька (м. Кривий Ріг)	3410	142	15000
ш. Тернівська (м. Кривий Ріг)	4392	183	15548
ш. ім. Фрунзе (м. Кривий Ріг)	2520	105	12890
ш. Ювілейна (м. Кривий Ріг)	4670	195	16780
ш. ім. Артема (м. Кривий Ріг)	3240	135	15660
ш. Гігант-Глибока (законсервована) (м. Кривий Ріг)	7128	297	21375
ш. Експлуатаційна (м. Дніпрорудне)	6537	272	15784

Як видно з наведеної інформації, найбільший водоприплив має місце на ш. Криворізька, що обумовлено складними гірничо-геологічними умовами. В табл. 1.4 наведена інформація про основні підземні горизонти шахт, на яких розміщуються водовідливні установки та кількості насосів на цих горизонтах.

Це призводить до необхідності не повертати всю викачану воду на глибокі горизонти шахт при генерації електроенергії, а накопичувати в відповідних водозбірниках на перших горизонтах (500 м, 437 м, 472 м, 527 м). Це дозволить скинути всю воду за денний час.

Таблиця 1.4 – Підземні горизонти та насоси шахт

Шахти	Горизонти (м) / кількість насосів
ш. Криворізька (м. Кривий Ріг)	500/7; 940/7; 1240/6; 1465/6
ш. Покровська (м. Кривий Ріг)	437/4; 965/4; 1115/4; 1265/4
ш. Козацька (м. Кривий Ріг)	472/5; 792/4; 1190/4; 1350/3
ш. Тернівська (м. Кривий Ріг)	527/5; 1050/4; 1200/4; 1350/4
ш. ім. Фрунзе (м. Кривий Ріг)	410/3; 910/3; 1060/4; 1135/2
ш. Ювілейна (м. Кривий Ріг)	480/5; 940/5; 1340/5
ш. ім. Артема (м. Кривий Ріг)	475/6; 865/8; 1045/5; 1135/9
ш. Гігант-Глибока (законсервована) (м. Кривий Ріг)	380/3; 540/5; 630/2; 710/2; 800/3
ш. Експлуатаційна (м. Дніпрорудне)	400/10; 480/7; 640/8; 840/5; 940/3; 1040/3

Для аналізу параметрів функціонування ГВК шахт визначено такий параметр, як коефіцієнт водоприпливу, що являє собою співвідношення оберту річного притоку (м^3) до обсягу річного водоприпливу ЗРС (рис. 1.16).

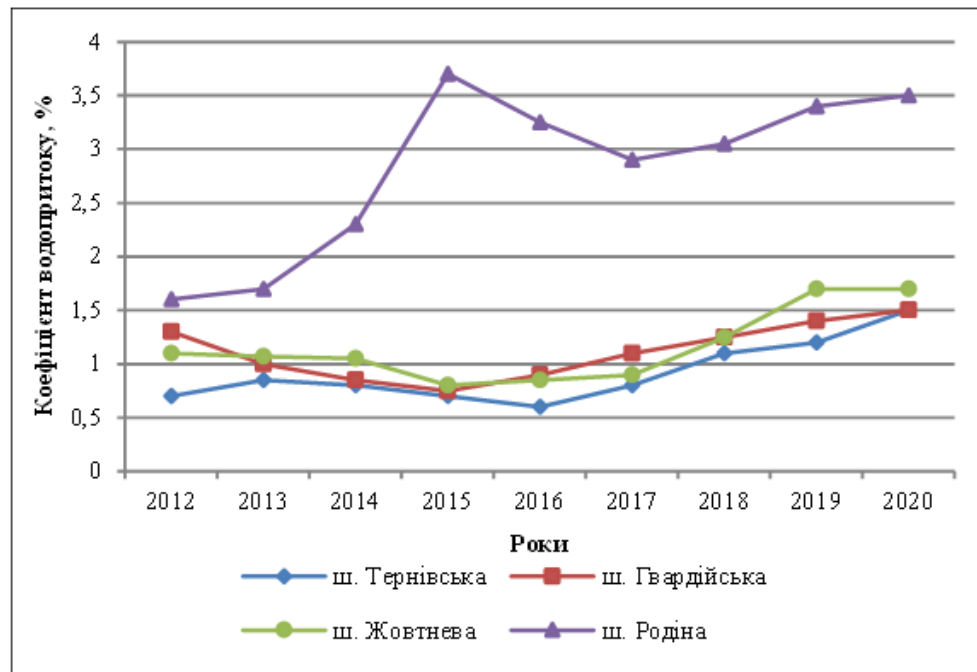


Рисунок 1.16 – Коефіцієнт водоприпливу ряду залізрудних шахт Криворізького залізрудного басейну

Для водовідливних установок застосовуються відцентрові насоси типу ЦНС (Додаток А). В табл. 1.5 наведені данні шахтних відцентрових насосах.

Таблиця 1.5 – Параметри експлуатуємих видів насосів для відкачування води з підземних горизонтів вітчизняних залізрудних шахт

Параметри	Типорозмір насоса		
	ЦНС 300-480	ЦНС 300-600	ЦНС 300-800
Подача, м ³ /год	300	300	300
Тиск, м	480	600	800
Тип двигуна	A4-450X-4M	A4-450X-4M	A-13-46-4A
Потужність двигуна, кВт	630	800	800
Частота обертання, об/хв	1475	1475	1450
Номінальна напруга, кВ	6	6	6

На рисунках 1.17 – 1.20 представлені графіки енергоспоживання насосних установок різних підземних горизонтів ряду шахт.

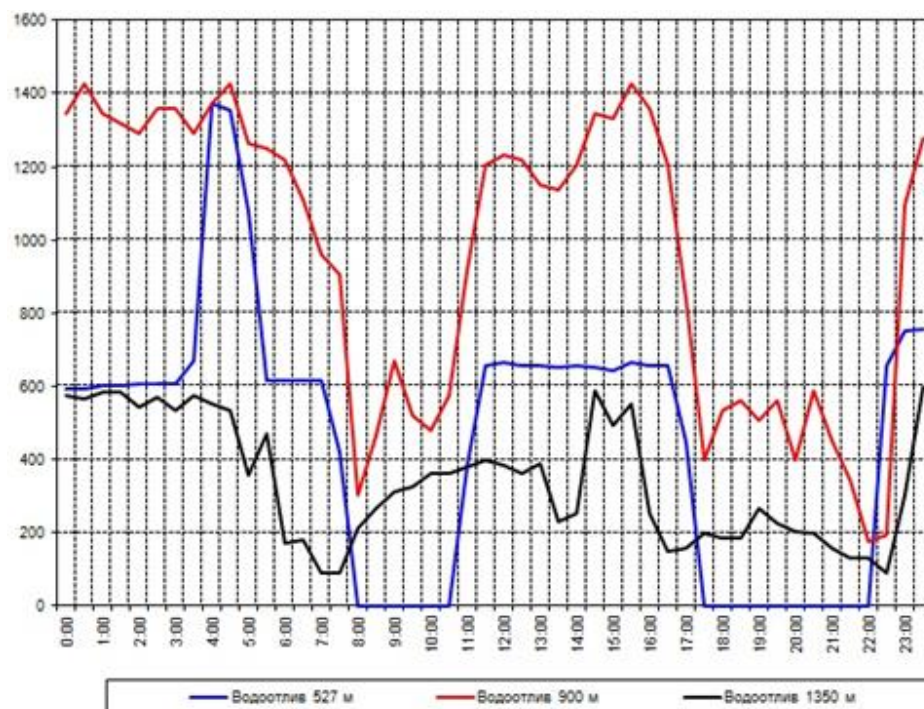


Рисунок 1.17 – Графіки споживання активної електроенергії електроприводами шахтних водовідливних комплексів ш. Тернівська (м. Кривий Ріг)

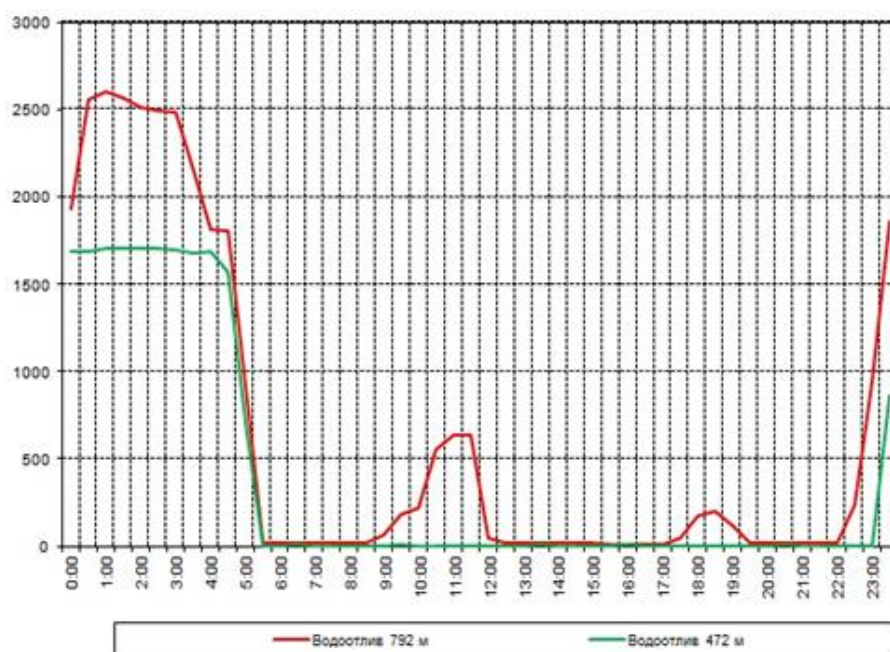


Рисунок 1.18 – Графіки споживання активної електроенергії електроприводами шахтних водовідливних комплексів ш. Козацька (м. Кривий Ріг)

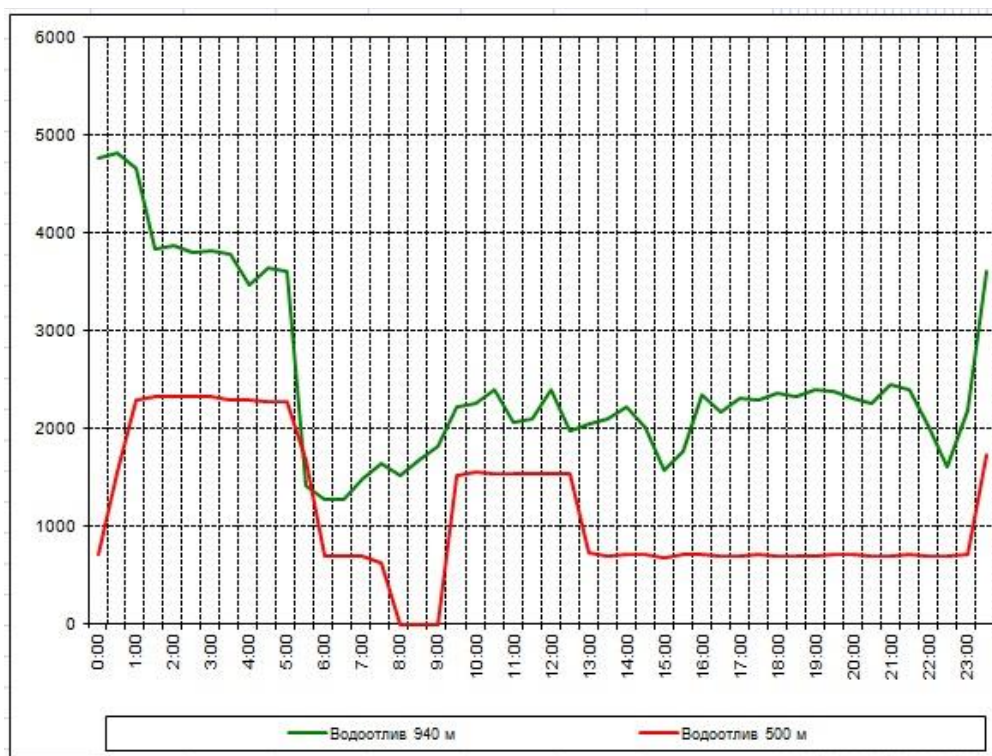


Рисунок 1.19 – Графіки споживання активної електроенергії електроприводами шахтних водовідливних комплексів ш. Криворізька (м. Кривий Ріг)

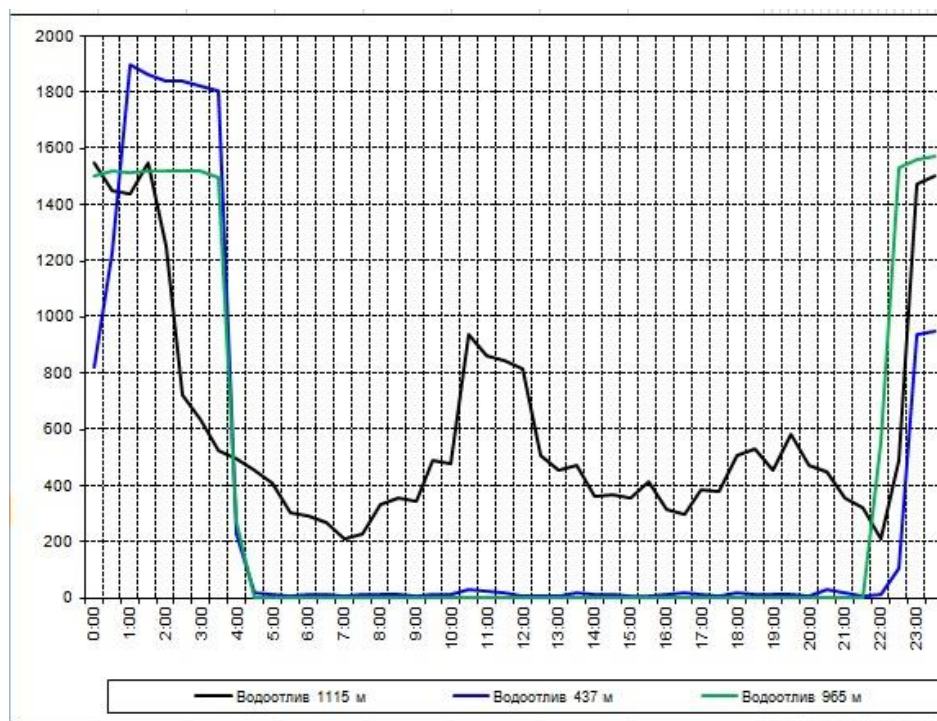


Рисунок 1.20 – Графіки споживання активної електроенергії електроприводами шахтних водовідливних комплексів ш. Покровська (м. Кривий Ріг)

На графіках видно, що насоси включаються для відкачки шахтних вод переважно в нічний час, коли вартість електроенергії мінімальна. У випадку, коли насоси не встигають відкачати повністю воду, вони можуть залучатися до роботи в денний період.

Оскільки на секціях шин підстанцій паралельно з насосами працюють й інші споживачі, вони вносять свою частку в процес збурювання графіків електроспоживання цих горизонтів.

1.4 Аналіз наукових доробок з вирішення проблеми підвищення електроенергоефективності водовідливних комплексів гірничих підприємств

Необхідність вирішення проблеми підвищення електроенергоефективності систем відведення підземних вод гірничих підприємств виникла і була поставлена однією з першочергових в переліку досліджень та пошуку шляхів досягнення цієї мети вже з першими кроками по створенню електромеханічних комплексів для цього процесу [78-79]. Однак, в часі, пошук як і «географія» шляхів досягнення позитивних результатів - змінювався. Так, з 50-х років минулого сторіччя акцент досліджень ставився на створенні АСК роботою водовідкачувальних насосів головних водовідливних установок. При цьому рівень технологічної реалізації відповідав, та й зараз відповідає, стану електротехнічної та електромеханічної елементної бази на існуючий час досліджень.

Саме в такому ракурсі базувалися перші спрямування в пошуку на платформі систем плавного (безреостатного) регулювання частоти обертів привідних, як правило, асинхронних електричних двигунів водяних насосів. По суті своїй ці дослідження в послідовному форматизувались в варіант переводу ГВК з режиму «споживач» в режим «споживач-регулятор» електричної енергії.

Певні позитивні здобутки в цьому спрямуванні були досягнуті [80-90]. До приведеного аспекту зазначимо, що в логістиці послідуєчих етапів досліджень ця складова в гамі своїх різновидностей з підвищення ефективності ГВК була і є стартовою необхідністю.

Новий підхід до дослідницького спрямування отримало з появою можливості застосування швидкодійних сучасних методів комп'ютерного моделювання процесу функціонування електромеханічних комплексів систем водовідведення для пошуку оптимальноорієнтованих режимів їх роботи.

Спрямованість вітчизняних дослідників в сфері переведення режимів функціонування ГВК з режиму «споживач» в режим «споживач-регулятор» знайшла своє місце в дослідженнях більше 40-ка років тому назад, і це при тому, що на той час проблема електроенергоефективності ще не була першочерговою задачею в проблемі підвищення комплексу ефективності ГВК. Згідно такого, «вчорашнього» бачення погляду, проблема в ті часи вирішувалась суто як необхідність переведення функціонування ГВК в автоматичний режим роботи. При цьому критерієм зміни режимів функціонування ГВК був факт рівня наповненості головного підземного водозбірника шахти.

Серед гамми досліджень, в цьому спрямуванні, своїми позитивними результатами для практики використання відрізняються дослідження когорт вчених наукової школи професорів Волотковського С.А., Герасимовича В.Н., Заїки В.Г., Півняка Г.Г., Праховнік А.В., Разумного Ю.Т., Розена В.П., Сінчука О.М., Стогнія О.В. Ці питання в свій час досліджувались також доцентом Шевчуком С.П., Данільчуком Г.І., Находовим В.Ф. та рядом інших вчених [34, 37, 57, 59, 91-107]. В подальшому, як варіант можливості вирівнювання добових графіків навантажень вугільних шахт з допомогою зміни режимів функціонування енергоємних споживачів в т.ч. ГВК, ці питання розглядали проф. Гордєєв В.І., Денисюк С.П., Качан Ю.Г., Кириленко О.В., Лежнюк П.Д.,

Ляхомський О.В., Розен В.П., Хромусов В.І., Червоний Е.Н., Щуцький В.В. [15, 19, 39, 42, 43, 46, 59, 61, 62] та ряд інших дослідників.

При цьому зауважимо, як факт, про важливість котрого для розбудови тактики досліджень автора буде зазначено в подальшому, це те, що дослідження вищезгаданих вчених базувались і стосувались вугільних шахт з їх технологічною специфікою видобутку даного виду корисних копалин і відповідно цього процесу водовідведення.

Нажаль в подальшому активність цих досліджень була зведена до нуля. Пов'язано це було з «людським фактором» існуючим на той період часу, коли енергетична складова в собівартості видобутку корисних копалин не була такою значимою.

Як компенсація такого факту були дослідження в вирішенні проблеми автоматичного керування ГВК для умов залізрудних шахт групи вчених Криворізького національного університету [22, 89, 96]. Водночас зазначимо, що в цих дослідженнях аналізувалось спрямування локального варіанту вирішення проблеми в форматі: «включити- виключити» в певні періоди годин доби. Цим самим прогнозувався, як факт вирішення проблеми енергоефективності ГВК, шлях зменшення рівнів сплати за спожиту ЕЕ зміною в часі добових графіків роботи ГВК перевівши по максимуму роботу цих комплексів в економічні (нічні) години доби. Певна економія матеріальних ресурсів при цьому дійсно мала місце, але водночас призвела до перевищення рівнів споживання ЕЕ в інші – позапікові години доби. Тобто фактична економія за спожиту ЕЕ в години пік мінімізувалась збільшенням рівнів споживання в непікові періоди доби.

В кінці 20-го століття кордони наукових пошукі в Україні в напрямку підвищення енергоефективності ГВК були розширені.

По факту, весь спектр цих плідних досліджень зводився і зводиться до єдиного глобального варіанту рішення: перевід електромеханічних комплексів

ГВК з режиму «споживач - регулятор» в режим «споживач-регулятор- генератор» електричної енергії.

В цьому напрямку будувались і інші дослідження. Так в роботі [103] наведено оригінальну інтегровану модель вуглевидобувного підприємства для оцінки та підтримки ефективних енергозаощаджувальних рішень, запропоновано розглядати підприємство, як комплексний об'єкт енергоспоживання, форматизувати процес водовідведення у вигляді моделі пов'язаних екземплярів чотирьох відповідних підсистем. Рішення такої інтегрованої моделі забезпечує синхронізм роботи підсистем керування загальною АСК рівнями електроспоживання підприємства в цілому. Проте, виходячи з аналізу матеріалу статті, в структурі запропонованої системи відсутнє диференціювання рівнів впливу енергоємних споживачів на загальні обсяги споживання підприємства, а рекомендований проект підсистем керування відзеркалює лише окремі складові технології функціонування підземного виробництва. Такий підхід упосереднює індивідуальність функціонування конкретних споживачів ЕЕ, і не дає можливості реалізувати енергетичний потенціал ГВК.

В наближенні саме до такого очікуваноефективного підходу проведені дослідження для умов золотовидобувних підприємств [108]. Тут автори спрямували свої пошуки на зниження рівнів споживання ЕЕ всіма енергоємними споживачами енергії підприємства, в тому числі насосами з відкачки підземної води.

Проводячи подальший аналіз з результатів рішення проблеми зазначимо, що в останні роки на перший план пошуків закордонних дослідників виходить ідея створення на базі водовідливних комплексів гірничовидобувних видів підприємств гідроаккумуляуючих електростанцій.

Вперше ідея використання шахт в якості базових структур для спорудження ГАЕС датувалась 1960 роком [109]. Однак ця ідея на той час не

супроводжувалась конкретикою в логістиці реалізації проекту, тому він так і не був реалізований.

В подальшому в 1975 р. був розроблений перший реальний експериментальний проект Mount Hope (на півночі Нью-Джерсі), але подальше його просування для довгострокової практичної реалізації також не було реалізовано [110].

В роботі [111] розглянуто реалізацію проекту створення ГАЕС з використанням для цього вугільних шахт, котрі виведені з експлуатації в Астурійському центральному вугільному басейні (Іспанія). Мережа тунелів шахт даного регіону, котрий експлуатується більше 200 років і в найближчі роки всі вугільні шахти регіону плануються до закриття, сформована більше, ніж 30-тю шахтами і може вмістити 200 тис. м³ води на глибинах 300-600 м. Це судячи з ідей авторів вельми позитивні моменти для створення ГАЕС. Роботи в цьому спрямуванні продовжуються.

В [112, 113] зазначається, що «системи гідроаккумуляції можна знайти в усьому світі». Але в основі своїй це ГАЕС значних масштабів. Проте попит на системи з розподільчою генерацією на базі відтворених джерел ЕЕ «відкрив ринок для нового покоління об'єктів відновлювальних джерел енергії, які можуть бути створені в значно менших масштабах, але будуть економічно життєздатними та екологічно прийнятними, ніж більш масштабні їх прототипи». В роботі наведено та розраховано очікувану продуктивність ГАЕС в функції ряду базових технологічних параметрів.

Така, або близька, до аналізуємої попереду, структура пошуку викладена в [114-123]. Тут форматизовано комплекс критеріїв, котрі рекомендовано для практичної реалізації при розробці проекту ГАЕС. Цінність даного дослідження полягає і в тому, що в ній викладено спектр рішень для майбутніх розробок. В роботі викладено цікавий факт, що проведені дослідження Всесвітнім банком

визнало, що більшість шахт Африки розташовані в районах з невідповідною інфраструктурою стосовно централізованого забезпечення їх електричною енергією, і, що саме ці шахти можуть «співпрацювати з владою в питаннях будівництва на основі їх систем водовідведення власних ГАЕС. Таким чином вони зможуть забезпечувати електроенергією не тільки власні потреби, а й населення».

В Україні дослідження по створенню ГАЕС на базі водовідливних комплексів шахт (рудників) набирають свого прискорення в останні десятиріччя. Отримано перші результати [119, 122, 123].

1.5 Форматизація наукових задач та визначення мети досліджень

Аналіз вищезазначених в попередньому розділі наукових досліджень, на некатегоричну думку автора, свідчить про те, що вони являють собою не тенденцію, а, хоча і необхідні, та все ж фрагментально локальні рішення в вирішенні проблеми підвищення енергоефективності ГВК підземних гірничих підприємств. Ці, цікаві по факту, дослідження коректно визначити як епізоди наукового пошуку в даному спрямуванні, котрі для отримання необхідного позитиву потрібно форматизувати для розроблення як підсистему структури «АСК електропостачання» підприємства.

Для отримання бажаного рівня позитиву в такому синергетичному варіанті рішення необхідно обґрунтування та оцінювання енергетичного стану та відповідного потенціалу підприємств в якісному виразі з конкретикою оцінювання та врахування особливостей технологій функціонування конкретного гірничовидобувного підприємства як індивідуума.

Аналізуючи, обґрунтовуючи та базуючись на авторському баченні вирішення проблеми, підвищення електроенергоефективності систем

водовідведення підземних вод залізорудних шахт та рудників, визначено як базові напрямки досягнення цієї мети (рис. 1.21).

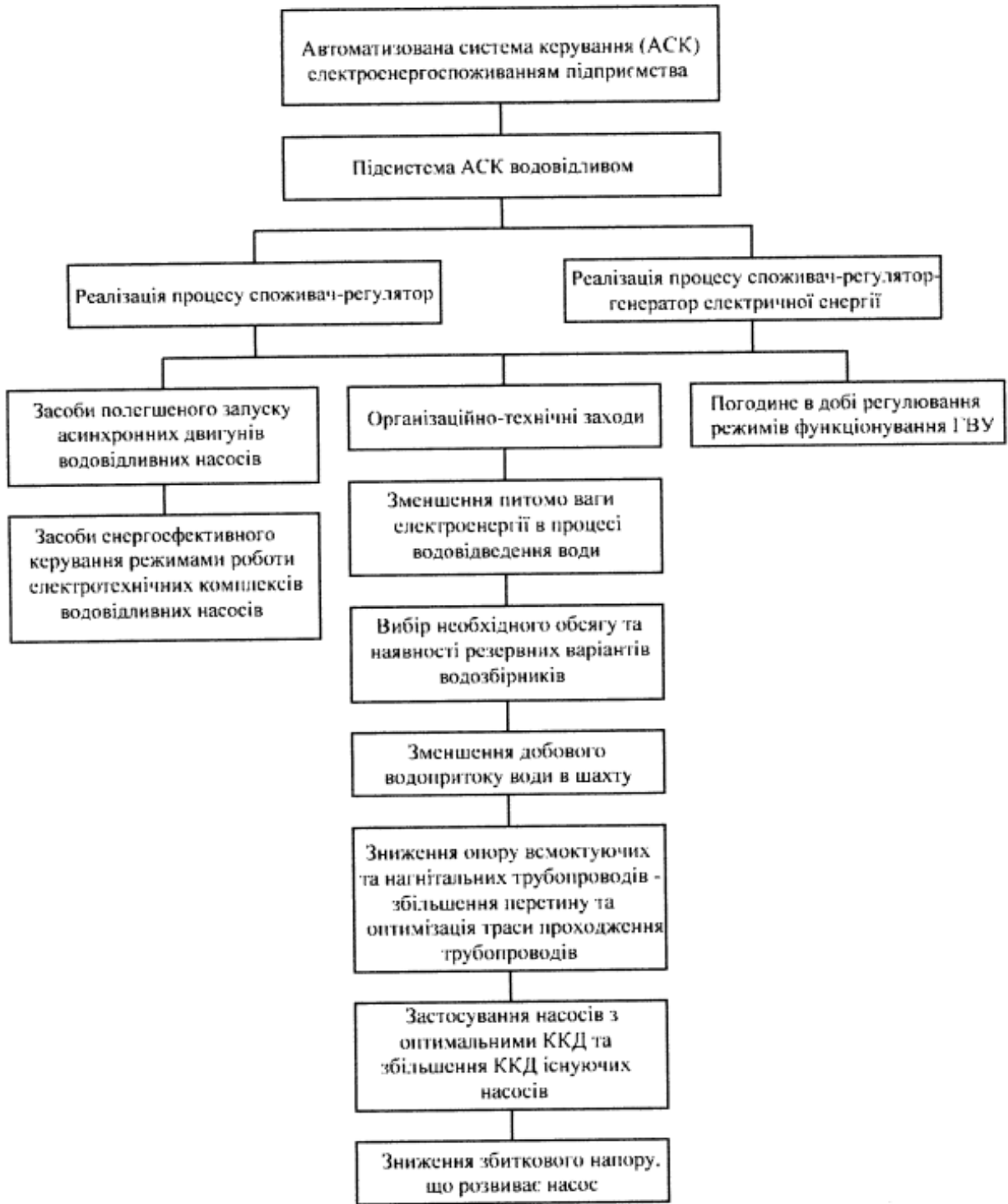


Рисунок 1.21 – Структура напрямків підвищення електроенергоефективності систем водовідведення підземних вод гірничорудних підприємств

Згідно комплексу цих пошукових спрямувань в роботі поставлена мета досліджень: підвищення електроенергоефективності функціонування систем водовідведення підземних вод шахт та рудників шляхом створення на базі їх головних водовідливних комплексів синергетичних електромеханічних комплексів з автоматизованим регулюванням режимів їх функціонування в варіанті «споживач – регулятор – генератор» електричної енергії. Згідно логістики процесу пошуку сформульовано для подальшого рішення наступні наукові задачі:

- дослідити і означити місце та значення ролі водовідливних установок в системі енергоефективності на залізорудних шахтах. Проаналізувати та визначити принципи побудови методів оцінювання електроспоживання водовідливними установками;
- провести аналіз стану, оцінювання потенціальних реалій та визначення шляхів оптимізації об'ємів споживання електричної енергії та рівнів сплати за неї в сучасних умовах функціонування гірничорудних підприємств з підземним способом видобутку залізорудної сировини;
- визначити корпоративну систему моделей процесу електроспоживання водовідливними установками на залізорудних шахтах;
- сформулювати методику комплексного оцінювання електроспоживання водовідливними установками залізорудної шахти;
- побудувати прогноз електроспоживання водовідливними установками залізорудних шахт задля прийняття відповідних управлінських рішень щодо забезпечення електроенергоефективності головних водовідливних установок;
- розробити методику варіативного аналізу електроенергоефективності функціонування ГВУ при варіативності алгоритмів його роботи.

1.6 Висновки до розділу 1

1. Незважаючи на незначну кількість енергоємних споживачів електричної енергії гірничих підприємств з підземним способом видобутку залізорудної сировини, саме ці приймачі споживають більше 90 % від загального обсягу даних видів підприємств, а режими їх функціонування характеризуються значними коливаннями в годинах доби та незначними сезонними.

2. Формат рішення проблеми в підвищенні енергоефективності видобутку залізорудної сировини лежить в площині створення узагальненої «АСК електроспоживання» з включенням в її структуру підсистем управлінського керування поточною енергетикою всього комплексу енергоємних комплексів.

3. Аналіз та оцінювання рівнів споживання електричної енергії, дозволивши встановити клас енергоємних споживачів гірничорудних підприємств підземними способами видобутку залізорудної сировини викреслив як пріоритетне першочергове спрямування для старту розбудови «АСК електроспоживання» даних видів підприємств – керування процесом відведення вод з підземних горизонтів відповідною підсистемою керування в комплексі вищезгаданої узагальненої структури АСК.

4. Враховуючи специфіку існуючої технології видобутку залізорудної сировини підземним способом, котра полягає в непрогнозованості зміни параметрів функціонування даних підприємств, в тому числі обсягів водоприпливів, керування комплексом водовідведення повинно здійснюватись на основі відповідного алгоритму з функцією адаптивності в примусовій зміні режимів роботи даних приймачів на базі прийняття та реалізації «розумних» управлінських рішень.

РОЗДІЛ 2

АНАЛІЗ ТА ВСТАНОВЛЕННЯ ВПЛИВОВИХ ФАКТОРІВ ДЛЯ ФОРМУВАННЯ ЕНЕРГООРІЄНТОВАНИХ РЕЖИМІВ СПОЖИВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ ВОДОВІДЛИВНИМИ КОМПЛЕКСАМИ ЗАЛІЗОРУДНИХ ШАХТ

2.1 Загальні проблеми та логістика комплексної оцінки електроспоживання водовідливними комплексами залізорудних шахт

Комплекс експериментальних досліджень, викладених в першому розділі даного дослідження, котрі були отримані в реальних умовах діючих вітчизняних підземних залізорудних підприємств, не може бути достатнім для кінцевого варіанту даного наукового пошуку без аналізу впливу технологічних факторів конкретних підприємств на такий узагальнений енергоекономічний показник виробництва як енергоефективність.

Проміж тим, треба розуміти, що говорячи, а тим паче аналізуючи та порівнюючи рівні електроенергоефективності, не коректно без розкриття фізики цього поняття стосовно таких непростих в сфері оцінювання електроенергетики споживачів як гірничорудні підприємства з підземними способами видобутку ЗРС та їх локальні енергетичні складові – головні водовідливні комплекси.

Різноманітний спектр технологічного обладнання та робочих процесів на залізорудній шахті може ускладнити розуміння деякими споживачами ефективності споживання електричної енергії. На процес споживання електричної енергії в умовах роботи залізорудних підприємств впливає значна кількість динамічних факторів. Серед них такі як технологія видобутку ЗРС, вік та ефективність обладнання, мотивація та навички персоналу. Ці факти повинні аналізуватись службами енергоменеджменту підприємств. На практиці це не так.

Одна з важливих причин того, що енергоменеджменту приділяється не достатня увага в Україні полягає в невизначеності, а іноді в відсутності надійних вхідних даних. Це в кінцевому виразі відображає процес формування вартості електричної енергії. Термін «енергетична інформаційна система» використовується в практиці дослідження для опису розвитку системи, яка підтримує збір, інтерпретацію формування комплексної оцінки електроспоживання взагалі, та водовідливними комплексами зокрема з метою вимірювання та перевірки енергії продуктивності та знайти можливості для зменшення споживання енергії та витрат на її сплату. Оскільки провідна практика формування комплексної оцінки електроспоживання водовідливними комплексами будується на доказах, а не на припущеннях, вирішення обмежень даних є важливим складовим в процесі пошуку. Однак поліпшення якості та своєчасності енергетичних даних не є простим і, як правило, вимагає фінансових вкладень, людських ресурсів протягом років для поступового вдосконалення засобів підвищення енергоефективності гірничих робіт. Тому важливо встановити поточний стан будь-якої існуючої енерго-інформаційної системи, а потім розробити обґрунтований план дослідження.

Формування комплексної оцінки електроспоживання водовідливними комплексами повинно включати збір даних, а також моделювання та аналіз.

Щоб визначити поточний стан складових процесу інформації щодо оцінювання електроспоживання водовідливними комплексами необхідно означити дані картографування споживання електроенергії та її вартість, які наразі доступні. Дані про споживання електроенергії та її вартість можна класифікувати за ієрархією відповідно зонального споживання ЕЕ. Доцільно встановити загальне споживання енергії на ділянці, а потім визначити, що такі енергетичні дані доступні за сферою використання та на рівні ключових процесів та значних окремих елементів обладнання. На кожному з цих рівнів доцільно

зафіксувати частоту доступності електроенергетичних даних. Це може відрізнятися від щорічно або щоквартально, аж до частих інтервалів для даних.

При формуванні комплексної оцінки електроспоживання ГВК постає питання як зміниться споживання кожного джерела електроенергії порівняно з минулим роком, і які причини (такі як збільшена споживання ЕЕ через збільшення глибини видобутку ЗРС, менша кількість зневоднення, зміна якості руди, зміна механізмів доставки або зміна процедур навчання обслуговуючого персоналу тощо). Опрацювання цих питань визначає можливості для формування комплексної оцінки електроспоживання ГВК. Це може дати інформацію про пріоритети для формування комплексної оцінки електроспоживання водовідливними комплексами щодо енергетично-інформаційної системи. Споживання енергії за часом використання вважається процесом зверху вниз. Дослідження доцільно розпочати з аналізу річних або щомісячних даних, вивчення тенденції у використанні електроенергії протягом означених періодів. Щоденні або погодинні дані рівнів споживання надають більш детальну інформацію. Робочий процес вважається безперервним і відносно незмінним, значні коливання та інші факти можуть бути виявлені аномалії використання електроенергії та дати важливе уявлення про сфери процесу, які слід дослідити більш докладно. Дані дослідження можуть підкреслити частку електроенергії «базової ваги» споживання. Вивчаючи споживання електроенергії під час простоїв виробництва, непотрібно ідентифікувати електроенергетичні навантаження. Порівнюючи споживання електроенергії при виробництві у часі, доцільно проаналізувати: які компоненти базового навантаження; як базове навантаження порівнюється з іншими подібними навантаженнями; як базове навантаження порівнюється з теоретичними межами процесу; чи можна ці навантаження контролювати, щоб вони працювали лише тоді, коли вони роблять свій внесок виробництво. Хоча може здатися ідеальним інвестувати у велику кількість лічильників електроенергії, що не завжди може бути найбільш

доцільним шляхом. Інший варіанти включають: використання тимчасових реєстраторів даних для моніторингу електроспоживання водовідливними комплексами від існуючих рахунків або приватних лічильників; використання тимчасового обліку або перетворювачів на існуючих лічильниках; організація встановлення лічильника інтервалу часу; зчитування існуючого лічильника (наприклад, лічильника рахунків) кожного дня в один і той же час протягом місяця.

Програмні системи, як правило, використовуються для перетворення необроблених даних у значущу інформацію. Програмне забезпечення може варіюватися від простої електронної таблиці до спеціального програмного забезпечення для управління електроенергією, пов'язаного до фінансових та операційних даних. Рівень деталізації в програмній системі, ймовірно, буде різним. Збалансованість потреби в додаткових даних полягає у складності отримання інвестицій щодо покращення електроенергетичної системи моніторингу. Покращений облік є засобом вирішення виробничих проблем. Існує достатньо інформації, щоб засвідчити, що існує значна можливість заощадити електроенергію та сприяти виробництву, але додатковий моніторинг покращить результат. Технічні умови на закупівлю обладнання та обладнання можуть включати компоненти обліку та системи зворотного зв'язку. Там, де дані відсутні, все одно може бути можливо адекватно оцінити та оцінити можливості до проведення більш детального електроенергетичного аналізу з використанням тимчасових або точкових вимірювань для перевірки точності аналіз при різних умовах. Доцільно виробникам або постачальникам електроенергії також мати дані або результати моделювання, які можуть бути використані для вивчення конкретних можливостей підвищення ефективності споживання ЕЕ. Для визначення доцільно використовувати аналіз чутливості моделі комплексної оцінки електроспоживання водовідливними комплексами.

Здійснення контролю та управління енергоспоживанням ГВК на основі наявного методичного забезпечення без його ґрунтовної переробки практично неможливо, оскільки ця дія спрямована на застосування спрощених аналітичних і емпіричних залежностей, розрахованих на одні і ті ж, незалежно від умов, вихідні дані. Тому доцільно застосування експериментально-аналітичного підходу. З огляду на це сформульовано основні шляхи підвищення рівня інформаційно-методичного та математичного забезпечення оптимального споживання ЕЕ об'єкта дослідження [124]:

- теоретичне обґрунтування методичних положень моніторингу ефективності електроспоживання ГВК за допомогою сучасних методів дослідження, моделювання, оптимізація та прогнозування;
- обґрунтування та визначення інформативних ознак і показників енергоефективності за допомогою факторного аналізу;
- побудова математичних регресійних моделей і їх оптимізація за критеріями: питомого електроспоживання, продуктивності і собівартості електроенергопостачання;
- побудова та прогнозування комплексного показника енергоефективності за допомогою аналітичного і багатофакторного аналізу, аналізу часових рядів; методом аналітичної угруповання сукупності даних спостережень з урахуванням статистичних зв'язків між ними.

Це особливо важливо в умовах обмеженого обсягу сукупності даних. До недавнього часу подібних досліджень не проводилося, оскільки це пов'язано з виконанням трудомістких процедур, що спираються на перевірку статистичних гіпотез. Однак застосування дискримінантного аналізу, методу головних компонент і факторного аналізу значно полегшують розбиття всієї сукупності вихідних даних на однотипні і однорідні підмножини (класи). При цьому у всіх випадках оцінка інформативності ознак повинна виконуватися на основі теоретико інформаційного підходу до вирішення завдань типовий класифікації

та діагностики споживання ЕЕ водовідливними комплексами з використанням заходів статистичного зв'язку між факторами [125]. Для оцінки корисності інформативних параметрів споживання ЕЕ ГВК може служити середнє значення евклідової відстані між математичними очікуваннями всіх пар поєднань образів [126]:

$$\varepsilon_{\text{ср}} = \frac{\sum_{i,j=1}^k \varepsilon_{i,j}}{C_k^2}$$

де ε_{ij} – евклідова відстань між математичними очікуваннями i -го і j -го образів.

Реалізація наведених шляхів можлива на базі сучасного математичного апарату. При цьому специфічне місце займає вихідна інформація щодо об'єкта дослідження. Як правило, вона характеризується певним набором просторових ознак, що впливають на ефективність електроспоживання. В залежності від поставленої мети можуть бути обрані різні признаки простору або області в них, в результаті чого іноді при розпізнаванні образів (об'єктів) одна і та ж пара об'єктів виявляється віднесеної як до одного і того ж, так і до різних класів (груп). Тому до якості сукупності даних і угрупованню інформативних ознак є жорсткі вимоги [127]. Формальної процедури завдання вихідної системи ознак поки не існує. Ознаки, використовувані при вирішенні тих чи інших завдань задаються лише на підставі досвіду і інтуїції фахівця, котрий проводить дослідження певного процесу. Надмірно великий обсяг інформації може призвести до того, що ступінь показності вибірки виявиться обернено пропорційна розмірності простору факторів (ознак), що в кінцевому рахунку може не тільки не поліпшити, а й навіть погіршити якість бажаного результату. Ідеальним було б не відшукування «інформативного набору чинників», а «комплексний опис» об'єктів, придатний для будь-якого варіанту їх класифікації. Однак цього досягти неможливо, скільки кількість властивостей будь-якого доступного для дослідження об'єкта або явища нескінченно. Крім того, вибір навіть кінцевої, але надлишкової для даного завдання системи опису не виправданий і суперечить природному вимогу

мінімуму витрат [128]. Тому питання про показності вибірки для оцінювання інформативності системи ЕЕ водовідливними комплексами в задачах оптимального споживання електричної енергії є важливим.

2.2 Аналіз вибору критеріїв оптимального електроспоживання енергоємними складовими залізрудних підприємств

Проведені в Розділі 1 дослідження призвели до доцільності визначення основних аспектів теорії побудови, що дозволять розкрити принципову можливість і методологію побудови критерію оптимальності споживання електроенергії в системі водовідливу залізрудного підприємства.

Виходячи із твердження, що будь-яка виробнича система функціонує в умовах обмежених ресурсів, рівень досягнення мети є обмежений і оптимальний режим функціонування системи передбачає вибір найкращого вектору дій X на множині можливих його варіантів. Для цього повинна бути об'єктивна математична характеристика пріоритетності дій. Кожний варіант системи електроспоживання, виходячи з свого обмеженого ресурсу, прагне забезпечити такий набір дій, який у найбільшій мірі наблизив би систему до поставленої мети, тобто мав би для цього найбільшу корисність. Така схема реалізується успішно при якій єдиним обмеженням рівня є рівень обсягу ресурсу.

Поведінка варіанту електроспоживання не може ідеально відповідати принципу максимуму відповідності спожитої енергії та її вартості, бо завжди можуть бути певні похибки і випадкові відхилення, але при відсутності тих чи інших можливостей характер відповідності в цілому не змінюється. Через це є обґрунтованим і закономірним вивчення даного аспекту виробничого процесу виходячи з засад принципу оптимальності. В такому випадку можна вважати обґрунтованим допущення, що для споживання ЕЕ існує певний критерій оптимальності, що регулює їх поведінку водовідливних пристроїв і цей критерій

на нашу думку, доцільно назвати цільовою функцією сприяння досягненню мети, до максимуму якої прагнуть всі можливі варіанти споживання електроенергії.

Слід зауважити, що таке означення цільової функції є неоднозначним. Якщо $f(x)$ є цільовою функцією, а $\eta(f(x))$ – довільна монотонно зростаюча функція аргументу $f(x)$, то будь-який умовний максимум $f(x)$ буде одночасно відповідати умовному максимуму функції $\tilde{f}(x) = \eta(f(x))$. Через це з точки зору даного означення цільової функції немає можливості відрізнити функції $f(x)$ і $\tilde{f}(x)$, тобто цільова функція визначена лише з точністю до монотонного перетворення і тому не відображає ніякої реальної кількісної величини. Ця функція лише вказує на те, який з наборів дій має перевагу над іншими. Але цього є цілком достатньо як для вивчення споживання електроенергії, так і для вивчення проблеми оптимізації рівнів ефективності електроенергії. З методологічної точки зору така неоднозначність цільової функції є зручною для її використання, бо дозволяє вибирати той чи інший її варіант у залежності від особливості конкретної досліджуваної задачі.

Даючи геометричну інтерпретацію цільової функції, її можна характеризувати набором гіперповерхонь байдужості у n -вимірному просторі x , на кожній з яких цільова функція залишається постійною. Монотонне перетворення цільової функції впливає не на форму цих гіперповерхонь, а лише на значення цільової функції на кожній з них.

Використовуючи одну із характерних властивостей цільової функції, яка відображає залежність між вартістю рівноваги і рівнем споживання електроенергії, можна записати таку залежність

$$p \cdot x = d, \quad (2.1)$$

де $p = (p_1, p_2, \dots, p_n)$ – вектор вартості споживання електроенергії;

$x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ – вектор цільових параметрів або вектор споживання електроенергії, що має вплив на рівень досягнення мети оптимізації споживання електроенергії на водовідливних пристроях залізорудного підприємства;

d – загальний обсяг ресурсу (точніше, загальні витрати на спожиту електроенергію за проміжок часу, що аналізується).

Серед всіх можливих векторів x , що задовільняють (2.1) залізорудне підприємство вибере той, який забезпечує максимальне значення цільовій функції $f(x)$. Оптимальне значення вектору x , можна відшукати за допомогою множників Лагранжа, допустивши при цьому диференційованість функцій $f(x)$:

$$L = f(x) + \lambda(d - px), \quad (2.2)$$

де λ – деякий довільний скалярний множник.

Застосувавши правило Лагранжа, отримаємо:

$$\nabla f(x) = \lambda p, \quad (2.3)$$

або в скалярній формі:

$$\frac{\partial f(x)}{\partial x_i} = \lambda p_i, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (2.4)$$

Цю властивість цільової функції можна застосувати для аналізу і прогнозування можливостей забезпечення електроспоживання. При відомій функції $f(x)$ залежність (2.4) може бути використана для визначення змін у структурі цільових параметрів при зміні вартості і обсягів спожитої електроенергії, а також для розв’язування оберненої задачі – визначення системи вартості, яка відповідає найбільш бажаній структурі цільових параметрів споживання електроенергії. Для розв’язування часткових задач використовують функції залежності можливостей електроспоживання від обсягів спожитої електроенергії і вартості. Але для отримання повної характеристики структурних елементів потрібно було би сумісно аналізувати цільові функції досягнення мети для кожного можливого ресурсу електроенергії.

Частинні похідні першого порядку цільової функції досягнення мети (2.4) можна інтерпретувати як величини пропорційної вартості рівноваги. Допустивши, що $f(x)$ двічі диференційована:

$$\frac{\partial f(x)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial f(x)}{\partial x_i} \right) = \lambda \frac{\partial p_i}{\partial x_j}. \quad (2.5)$$

Вони характеризують залежність вартості рівноваги від числових значень всіх видів цільових параметрів. Якщо вважати, що квадратна матриця $\left\| \frac{d^2 f(x)}{dx_i dx_j} \right\|$ характеризує залежність вартості рівноваги від числових значень всіх можливих наявних цільових параметрів, то частинні похідні першого порядку (2.3) і другого порядку (2.4) досить повно характеризують цільову функцію $f(x)$ в широкій структурі цільових параметрів і відповідній до неї системі вартості рівноваги. На основі цього можна отримати квадратичну модель цільової функції. Нехай $\bar{x}$ – деяка відома структура цільових параметрів і відомий відповідний до цієї структури вектор вартості рівноваги $\bar{p}$.

Розкладемо функцію $f(x)$ в ряд Тейлора в околі точки $\bar{x}$ і обмежимося квадратичним наближенням цього розкладу:

$$f(x) = f(\bar{x}) + \nabla f(\bar{x})(x - \bar{x}) + \frac{1}{2}(x - \bar{x}) \left\| \frac{d^2 f(x)}{d\bar{x}_i d\bar{x}_j} \right\| (x - \bar{x}). \quad (2.6)$$

Добуток вектору $(x - \bar{x})$ на матрицю $\left\| \frac{d^2 f(x)}{d\bar{x}_i d\bar{x}_j} \right\|$ і вектор $(x - \bar{x})$ виконується

за правилами векторно-матричного числення, в результаті чого квадратичний член набув би такої скалярної форми:

$$\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{d^2 f(x)}{dx_i dx_j} (x_i - \bar{x}_i)(x_j - \bar{x}_j). \quad (2.7)$$

За означенням цільова функція визначена з точністю до монотонного перетворення, що дозволяє відкинути постійні доданки і постійні множники. Спираючись на це, (2.7) можна записати наступним чином:

$$f(\Delta x) = \bar{p}(\Delta x) + \frac{1}{2} \Delta x R \Delta x, \quad (2.8)$$

$$\text{де } \Delta x = x - \bar{x}, \quad R = \|z_{ij}\|, \quad z_{ij} = \frac{\partial^2 f(x)}{\partial \bar{x}_i \partial \bar{x}_j}.$$

Проблему необхідного врахування великої кількості видів цільових параметрів при практичному використанні цільової функції можна вирішувати принаймні двома шляхами: один – агрегування видів цільових параметрів, і другий – застосування часткових цільових функцій.

Числові значення видів цільових параметрів для кожної k -ої, де $k = 1, 2, \dots, K$, групи x^k можна визначати, використавши коефіцієнти входження кожного параметра i -го виду деталізованого переліку α_i^k в одиницю k -го числового значення цільового параметра укрупненого переліку. В скалярній формі запису матимемо:

$$x^k = \sum_{i \in k} p_i^k x_i^k. \quad (2.9)$$

Співвідношення між цінами деталізованого й укрупненого переліку цільових параметрів можна скласти через відповідні вартісні показники, аналогічно до (2.10)

$$p^k = \sum_{i \in k} p_i^k \alpha_i^k x_i^k, \quad (2.10)$$

де p^k, p_i^k – вартісний еквівалент одиниці числового значення цільового параметра відповідно агрегованого й деталізованого переліку.

Другий шлях вирішення проблеми великої розмірності пролягає через введення часткових цільових функцій для конкретних груп цільових параметрів. Знаючи часткові функції, які побудувати, очевидно, простіше, можна побудувати загальну цільову функцію досягнення мети, наприклад, у такому вигляді.

$$f(x) = \varphi[f_k(x)], \quad k = 1, 2, \dots, K. \quad (2.11)$$

Найбільш суттєвим чинником, що впливає на вигляд цільової функції сприяння досягненню мети є особливості структурних поєднань цілей, що робить доцільним побудову загальних цільових функцій для кожного варіанту, а потім ці функції відповідним чином поєднання в єдину загальну цільову функцію, використовуючи найбільш реальний розподіл ресурсів між різними можливими варіантами електроспоживання.

Другим найважливішим елементом критерію оптимальності споживання електроенергії водовідливними пристроями є корегуюча функція $W(t)$, яка повинна уточнювати в часі цільову функцію $f(x)$. Конкретний вигляд цієї функції залежить від всієї сукупності об'єктивно існуючих чинників. Ця функція повинна відображати переваги цільових параметрів в досягненні залізрудним підприємством поставленої мети. А воно прагне досягти її якомога скоріше опираючись як на суб'єктивні, так і на об'єктивні підстави.

Корегуюча функція також повинна враховувати певну невизначеність в трактуванні споживання електроенергії, зокрема споживання електроенергетичних ресурсів і виробництва продукції. І таких впливових чинників є багато, що робить проблему побудови коригуючої функції досить складною і неоднозначною. Один з перспективних підходів побудови коригуючої функції ґрунтується на основі ковзкого перспективного планування, що є найбільш близьким до реальної схеми неперервного рішення.

Коригуюча функція дає можливість допущення неточності виправляти при наступних розрахунках, але це є дуже помилковим. Неправильний вибір функції

$W(t)$ погіршує гладкість траєкторії споживання ЕЕ, що тягне за собою значні втрати рівнів ефективності використання ресурсів споживання електроенергії та призводить до збільшення тривалості часу у напрямку до досягнення обраної мети.

Найбільш вдалий вибір функції $W(t)$ передбачає мінімальні сумарні зміни траєкторії споживання ЕЕ. Цього можна досягти наступним чином. Перед кожним розрахунком щодо оптимального споживання ЕЕ здійснюється попередній розрахунок декількох альтернатив за укрупненими групами цільових параметрів, використовуючи розумні варіанти коригуючої функції $W(t)$. Така сукупність розкриє виробничі можливості споживання ЕЕ залізорудного підприємства у період часу, що аналізується. В межах цих можливостей вибирається конкретний варіант, що у перспективі забезпечить мінімальні відхилення траєкторії споживання ЕЕ залізорудного підприємства від ідеалу.

Вибір конкретної стратегії споживання ЕЕ визначає і варіант коригуючої функції $W(t)$, який потрібно буде використовувати при розрахунках за деталізованим переліком цільових параметрів. Але слід зауважити, що такий вибір коригуючої функції за своєю суттю має значну частку суб'єктивізму. Об'єктивізм при цьому досягається завдяки врахуванню реальних умов гірничорудного виробництва.

Оптимальні варіанти стратегії споживання ЕЕ залізорудним підприємством, що розраховані в один і той же час для різних варіантів $W(t)$, зручно аналізувати і порівнювати за допомогою визначальних параметрів, які є деякими функціями часу і наочно ілюструють розвиток виробничої системи. Для кожної коригуючої функції визначальні параметри будуть набувати конкретного вигляду і за значеннями яких вибирається конкретний варіант функції $W(t)$.

Між тим, визначальні параметри розвитку підприємства, в тому числі енергогосподарства, можуть мати різне трактування. В нашому випадку пропонується взяти в якості таких параметрів відносний темп зростання

ефективності електроенергетичних ресурсів. Перший з них може бути розділений на декілька складових у залежності від напрямів використання електроенергетичних ресурсів. Другий з цих параметрів може бути опущений при досить тривалому часовому періоді.

Розраховуючи оптимальну стратегію електроспоживання ГВК на залізорудному підприємстві за критерієм (2.18), і розв'язуючи відповідну двоїсту умовно-екстремальну задачу оптимального планування споживання ЕЕ можна отримати як кількісні показники всіх видів цільових параметрів для всіх моментів часу, так і їх оптимальної вартості, приведені до моменту часу $t=0$. Результатом розв'язування цих задач можуть бути векторна функція оптимальних значень цільових параметрів $\hat{x}(t)$ і відповідна їм оптимальна вартість, що визначаються векторною функцією $p_x(t)$. На їх основі можна визначити відносний темп зростання ефективності споживання ЕЕ $\alpha(t)$ для конкретного часу t :

$$\alpha(t) = \frac{p_x(t) \frac{d\hat{x}(t)}{dt}}{p_x(t) \hat{x}(t)}. \quad (2.12)$$

Виходячи з вигляду даної залежності, можна зробити такі зауваження. Диференціювання по часу тут не стосується вартості, бо порівнювати два набори значень цільових параметрів для різних моментів часу потрібно у порівняльних цінах. Крім цього можна зробити висновок, що вираз (2.12) не залежить від масштабу цін, адже ціни присутні у чисельнику і в знаменнику.

Маючи для оптимальної стратегії споживання електроенергії векторну функцію основних $\hat{y}(t)$ і їх оптимальні ціни $p_y(t)$ відносний темп зростання $\beta(t)$ запишеться таким чином:

$$\beta(t) = \frac{p_y(t) \frac{d\hat{y}(t)}{dt}}{p_y(t) \hat{y}(t)}. \quad (2.13)$$

Аналогічним чином можна описати інші параметри, що характеризують відносні темпи зростання для будь-якої іншої сукупності електроенергетичних ресурсів.

Очевидно, що параметри $\alpha(t)$ і $\beta(t)$ істотно залежать від коригуючої функції $W(t)$, адже для кожного її варіанта можна розраховувати відповідні параметри $\alpha(t)$ і $\beta(t)$, це означає, що для різних функцій $W(t)$ отримуються різні результати таких розрахунків.

Для розрахунку коефіцієнта ефективності електроспоживання розглядатимемо поряд з приведеними оптимальними цінами до одного моменту часу $t=0$, $p_x(t)$ і неприведені оптимальні ціни цільових параметрів, які вражатимуться векторною функцією $\bar{p}_x(t)$. Вони пов'язані з приведеними таким співвідношенням:

$$\bar{p}_x(t) = \gamma(t) p_x(t), \quad (2.14)$$

де $\gamma(t)$ – монотонно зростаюча скалярна функція, аргументом якої є час t і яка може трактуватися як один з показників ефективності споживання електричної енергії на залізорудному підприємстві.

Конкретизація функції $\gamma(t)$ можлива на основі динаміки цін, тенденція зміни може бути виражена функцією $\delta(t)$. З врахуванням можна записати:

$$\bar{p}_x(t)x(0) = \bar{p}_x(0)x(0)\delta(t), \quad (2.15)$$

де $\delta(0) = 1$.

Якщо $\delta'(t) < 0$ – ціни спадатимуть, при $\delta'(t) > 0$ – ціни зростатимуть і при $\delta'(t) = 0$ – ціни залишатимуться незмінними.

Функцію $\gamma(t)$ для оптимальної стратегії споживання електричної енергії і конкретно вибраної функції $W(t)$ можна визначити таким чином:

$$\gamma(t) = \frac{\bar{p}_x(0)x(0)\delta(t)}{p_x(t)x(0)} \quad (2.16)$$

Залежність між приведеними і неприведеними оптимальними цінами справедлива не тільки для цільових параметрів $x(t)$. Вона справедлива і для інших вбиваючих факторів, бо інакше ціни не зможуть служити засобом відповідних розрахунків, в тому числі і для розрахунків показників ефективності споживання ЕЕ.

В теорії оптимального управління поняття рівня ефективності набуває найбільш загальної суті. Ця ефективність щодо споживання електричної енергії розглядається як інструмент приведення до одного моменту часу неприведених оптимальних цін ресурсів ЕЕ для двох сусідніх одиничних відрізків часу. Так, наприклад, в момент часу t відношення неприведених цін до приведених дорівнює 5, а в момент часу $(t+1)$ -6, то коефіцієнт ефективності споживання ЕЕ $\eta(t)$ визначається таким чином:

$$\frac{\bar{p}_x(t)}{p_x(t)} = 5; \quad \frac{\bar{p}_x(t+1)}{p_x(t)} = 6; \quad \eta(t) = \frac{6}{5} - 1 = 0,2, \quad (2.17)$$

що відповідає ефективності рівній 20 %.

При зміні інтервалу часу на Δt коефіцієнт ефективності $\eta(t)$ можна визначити з таких рівнянь, які справедливі для всіх видів цільових параметрів, позначених індексом i :

$$1 + \eta(t)\Delta t = \frac{\bar{p}_i(t + \Delta t)}{p_i(t + \Delta t)} : \frac{\bar{p}_i(t)}{p_i(t)}, \quad (2.18)$$

або для малих змін проміжку часу dt :

$$1 + \eta(t)dt = \frac{\bar{p}_i(t + dt)}{p_i(t + dt)} : \frac{\bar{p}_i(t)}{p_i(t)}. \quad (2.19)$$

Враховавши (2.26) і те, що величина dt є досить малою, можна записати:

$$1 + \eta(t)dt = \frac{\gamma(t+dt)}{\gamma(t)} = 1 + \frac{d\gamma(t)}{\gamma(t)}, \quad (2.20)$$

або

$$\eta(t) = \frac{1}{\gamma(t)} \frac{d\gamma(t)}{dt} = \frac{d}{dt} \ln \gamma(t). \quad (2.21)$$

А це означає, що коефіцієнти ефективності економічних процесів виражаються як логарифмічна похідна функції $\gamma(t)$.

З врахуванням (2.34) можна записати (2.28) у такому вигляді:

$$\eta(t) = \frac{d}{dt} \ln \delta(t) - \frac{d}{dt} \ln p_x(t)x(0). \quad (2.22)$$

Це означає, що коефіцієнт ефективності споживання електричної енергії залежить від двох факторів: зміни масштабу неприведених оптимальних цін і динаміки зміни приведених цін. Слід зауважити, що коефіцієнт ефективності $\eta(t)$ залежить від функції $W(t)$ критерію (2.22) і для кожної такої функції $W(t)$ існує своя стратегія споживання і, звичайно, свій коефіцієнт ефективності $\eta(t)$.

Особливості процесу вибору коригуючої функції можна відобразити, досліджуючи просту модель оптимального споживання електроенергії методами варіаційного числення для неперервного аргументу t .

Будемо розглядати один вид цільового параметра, швидкість зміни якого в момент часу t позначимо через $x(t)$, а цільову функцію досягнення мети – через $f(x)$. В початковий момент часу $t=0$ швидкість зміни цільового параметра є відомою і визначається величиною $x(0)$. Розглядається один фактор, який може відповідати, наприклад, потужність насосу. Визначається потужність (для простоти назвемо його у даному випадку виробничим ресурсом) в момент часу t величиною $y(t)$, а в момент часу $t=0$ – величиною $y(0)$.

Одиниця виробничого фактору забезпечує зміну цільового параметра $x(t)$ на одиницю в одиницю часу. Для розширення отримання виробничого ресурсу

на одиницю в одиницю часу, потрібно $p(t)$ одиниць цього ресурсу. Вважається, що виробничі ресурси використовуються повністю. Частка виробничого ресурсу $y(t)$, залученого для зміни цільового параметру $x(t)$, визначається величиною $k(t)$, а для розширення виробничого ресурсу, відповідно – $(1-k(t))$. При $t=0$ величина $k(0)$ визначається таким чином:

$$k(0) = \frac{x(0)}{y(0)}.$$

Вона характеризує для початкового моменту часу розподіл виробничого ресурсу (потужності ресурсів) y .

Модель описаної ситуації в прийнятих позначеннях матиме вигляд:

$$x(t) = k(t)y(t), \quad (2.23)$$

$$\frac{\partial y(t)}{\partial t} = \frac{[1-k(t)]y(t)}{\rho(t)}. \quad (2.24)$$

У цій моделі використовуватиметься критерій оптимальності у вигляді (2.25), лише $x(t)$ вважатиметься скалярною функцією часу. Суть задачі полягає в максимізації критерію оптимальності

$$F = \int_0^{\infty} W(t) f[x(t), t] dt, \quad (2.25)$$

при обмеженнях:

$$x(t) = k(t)y(t), \quad (2.26)$$

$$y'(t) = \frac{1-k(t)}{\rho(t)} y(t). \quad (2.27)$$

Виключивши з (2.27) функцію $k(t)$ і виразивши $x(t)$ через $y(t)$ можемо записати:

$$x(t) = y(t) - \rho(t)y'(t). \quad (2.28)$$

Функціонал (2.26) з врахуванням (2.27), (2.28) матиме вигляд:

$$F = \int_0^{\infty} \Phi[t, y(t), y'(t)] dt. \quad (2.29)$$

Екстремальне значення функціоналу (2.29) при опуклій функції $f(x)$ існує і його відшукування зводиться до розв'язування диференціального рівняння Ейлера-Лагранжа:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial y} = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Phi}{\partial y'} \right) = 0. \quad (2.30)$$

В нашому випадку вважатимемо функцію Φ підінтегральною функцією в (2.26), де $x(t)$ визначається з (2.27). З врахуванням цього, рівняння (2.30) переписеться у такому вигляді:

$$W(t) \frac{df[x(t)]}{dx(t)} + \rho(t) \frac{d}{dt} \left[W(t) \frac{df[x(t)]}{dx(t)} \right] = 0. \quad (2.31)$$

Розв'язок цього рівняння матиме вигляд:

$$W(t) \frac{df[x(t)]}{dx(t)} = ce^{-\alpha(t)t}. \quad (2.32)$$

де c – постійна інтегрування.

Позначимо $\frac{df[x(t)]}{dx(t)}$ через $z=z(x)$ і визначимо c і $p(t)$ за заданими початковими умовами $x(0)$. З врахуванням цього (2.31) можна записати у такому вигляді:

$$z[x(t)] = z[x(0)] W^{-1}(t) e^{-\frac{1}{\rho} t}. \quad (2.33)$$

Розв'язок цього рівняння буде таким:

$$\hat{x}(t) = z^{-1} \left\{ z[x(0)] W^{-1}(t) e^{-\frac{1}{\rho} t} \right\}. \quad (2.34)$$

Таким чином (2.34) визначає оптимальне значення цільового параметра $x(t)$ для всіх варіантів значень функції $W(t)$.

Оптимальну програму нагромадження виробничого ресурсу $y(t)$ можна визначити, розв'язуючи рівняння (2.34) у такому вигляді:

$$\rho(t)y'(t) - y(t) = -\hat{x}(t). \quad (2.35)$$

Розв'язком цього рівняння буде:

$$y(t) = y(0)e^{-\frac{1}{\rho}t} - \rho e^{-\frac{1}{\rho}t} \int_0^t \hat{x}(t)e^{\frac{1}{\rho}t} dt = \hat{y}(t). \quad (2.36)$$

Використовуючи (2.33) для визначення оптимальних приведених цін, слід пам'ятати, що дана задача не є задачею лінійного програмування в розумінні якої трактуються оптимальні ціни. Але вважатимемо, що такі ціни існують і що їм властиві аналогічні властивості.

На прикладі моделі (2.33)-(2.36) було проілюстровано основи методики вибору корегуючої функції $W(t)$.

Було отримано співвідношення, які дозволяють будувати визначальні параметри стратегії споживання ЕЕ для різних варіантів коригуючої функції. І навпаки, отримати корегуючу функцію $W(t)$ за заданими варіантами визначальних параметрів чи за фіксованими співвідношеннями між ними.

Проведене дослідження підтверджує, що корегуюча функція є об'єктивно обґрунтованим елементом критерію оптимальності споживання ЕЕ водовідливними комплексами залізорудного підприємства. До того ж проілюстровано, що корегуюча функція має досить вузький і конкретно визначений діапазон зміни. Безпосередній зв'язок між коригуючою функцією і визначальними параметрами дозволяє конкретизувати корегуючу функцію в межах її допустимих значень, виходячи з принципу мінімальних відхилень від його оптимальної стратегії електроспоживання у всі наступні моменти часу

2.3 Моделювання процесу оцінювання електроспоживання водовідливними комплексами залізорудних шахт

Важливу роль при дослідженні процесу формування електроспоживання на залізорудних підприємствах виконують методи вимірювання зв'язку. Практика доводить доцільність застосування кореляційно-регресійного аналізу та непараметричних методів задля визначення відповідних взаємозв'язків. Означені методи надають можливість проаналізувати електроспоживання на залізорудних промислових підприємствах взагалі та ГВК зокрема. При дослідженні процесу електроспоживання водовідливними комплексами залізорудних шахт доцільно визначити сукупність і зміст показників, які дозволять більш обґрунтовано оцінювати використання застосованих і споживаних ресурсів на всіх етапах функціонування; планувати поточну діяльність процесу електроспоживання водовідливними комплексами залізорудних шахт; виявляти резерви підвищення виробництва тощо. Таким чином, у сьогоденних умовах у структурі інформаційного простору процесу електроспоживання водовідливними комплексами залізорудних шахт більш значне місце повинна займати аналітична інформація. У зв'язку з цим своєчасність та достовірність відповідної інформації стає важливим фактором, що забезпечує можливість підвищення ефективності всього процесу електроспоживання (Додаток Б).

Як зазначають науковці, моделювання – це ефективний спосіб пізнання закономірностей і законів довколишнього світу. Зміст моделювання полягає в заміні певною конструкцією реального процесу. Така конструкція, як правило – аналітичні співвідношення. В них відображаються основні риси процесу при цьому абстрагуючись від неістотних складових. Тобто результат моделювання – це образ реальності, який має спрощений, схематичний вид. Природно, що

визначаючи моделювання, як мистецтво треба акцентуватись на спрощені. Але необхідно визначати як і де треба спрощувати [129].

За своєю природою процеси споживання електроенергії ГВК - стохастичні, ймовірнісні; невизначеність – їх внутрішня властивість. Вивчення цих процесів, передбачення перспектив їх подальшого розвитку, прийняття оптимальних рішень щодо ефективного споживання ЕЕ мають використовувати моделі, які в певних умовах невизначеності вбезпечують надійність та сталість висновків. Такими моделями, за всіма ознаками є статистичні моделі. Ці моделі відносяться до класу математичних. Вони формуються у вигляді алгоритмів, функцій, рівнянь. Розв’язування та їх аналіз поєднують в собі ймовірнісні і логіко-алгебраїчні методи.

Статистична модель являє формально абстрактну схему взаємовідношень між величинами, що визначають відзнаки реального процесу. Опрацювання цих схем відношень та вибір ознак здійснюється неформально. Апріорний аналіз щодо природи процесу дозволяє сформулювати гіпотези відповідно до закономірностей і властивостей.

Реальний процес і математична схема моделі споживання ЕЕ взаємопов’язуються поєднанням інформації двох типів:

- 1) співвідношенням і взаємозв’язком логічно обґрунтованих гіпотез відповідно до характеру і властивостей процесу;
- 2) емпіричних даних, які визначають означений характер та властивості.

Модель дозволяє імітувати відповідні механізми формування закономірностей. Вона з’ясовує відповідність гіпотез та сукупність фактів. Застосування моделей дозволяє проводити експерименти. Результати моделювання поширюються на реальні процеси. Визначальна вимога, що ставиться до формування моделі – це адекватність реальному процесу.

Логіка статистичного моделювання може бути представлена наступними етапами:

- визначення цілі та об'єкта моделювання;
- аналіз вихідних даних;
- загальна математична формалізація моделі;
- оцінювання визначених параметрів моделі;
- перевірка на адекватність сформованої моделі;
- аналіз та інтерпретація результатів моделювання.

Перший етап визначає ціль та об'єкт моделювання. Мета першого етапу - це підсумкове призначення моделі. Наприклад: діагностика процесу, формування механізму та аналіз; тенденції розвитку процесу тощо. Природно, що один і той же процес можна відобразити різними моделями. Це залежить від мети моделювання.

Об'єкт моделювання – це статистична сукупність. В такій сукупності реалізується закономірність. Відомо, що формально всяку сукупність існує можливість представити у вигляді ранжованого набору даних з відповідними параметрами n, m, T , де n – кількість елементів сукупності ($j = 1, 2, \dots, n$), m – кількість зареєстрованих у j -го елемента ознак ($i = 1, 2, \dots, m$), T – календарний строк періоду з певними квантами часу (рік, квартал, місяць, доба тощо). Таким чином, можемо зазначити, що інформаційна одиниця об'єкта моделювання - значення i -ї ознаки у j -го елемента сукупності у t -му періоді – $x_{ijt_{ij}}$. Інформація зображається матрицею $n \times m$, якщо сукупність формується в статистиці, а якщо в динаміці, то матрицею $t \times m$.

Характеристика об'єкта моделювання містить такі складові:

- обрання одиничного елемента сукупності, який вважається носієм характерних рис для закономірності;
- формулювання просторових і часових обсягів об'єкта моделювання;
- визначення ознакової множини моделі.

Від ступеня об'єкта моделювання залежить вибір первинного елемента сукупності. Споживання ЕЕ можна вивчати на рівні галузі, окремих підприємств,

цехів і навіть окремих робітників. Природно, що у кожному випадку, який аналізується, елемент сукупності буде іншим. Границі об'єкта моделювання визначається розміром сукупності n для статичних моделей і тривалістю періоду T – для динамічних.

При визначенні ознакової множини X значну роль відіграють експертне оцінювання значущості та інформативності окремих ознак. При цьому необхідно враховувати можливість точного вимірювання, трудомісткість збирання інформації, діапазон варіації.

Статистичне моделювання передбачає розгляд сукупності як вибірку, що може бути класичної або гіпотетичною. Класична вибірка визначається, як частина реальної генеральної сукупності. Гіпотетична генеральна сукупність характеризується кількістю можливих наслідків функціонування об'єкта моделювання, а не кількістю елементів. Дефініція «генеральна сукупність» використовується в разі, коли йдеться про об'ємну, але кінцеву сукупність об'єктів, які досліджується. На практиці, як правило, мають справу зі скінченими сукупностями. В наукових дослідженнях зазначається, якщо відношення обсягу генеральної сукупності до обсягу вибірки складає більш, ніж 100, то, за словами Гласса і Стенлі методи оцінювання для скінчених і нескінчених сукупностей дають у сутності однакові результати [130]. Генеральною сукупністю можна вважати і повну сукупність значень будь якої ознаки. Головною засадою задля оцінювання характеристик генеральної сукупності є належність вибірки до генеральної сукупності.

Основна ідея основана на неможливості повного вивчення всіх об'єктів генеральної сукупності, тому як вимагає багато часу і значних матеріальних витрат [131].

Залізорудні підприємства є досить специфічними підприємствами щодо споживання ЕЕ, а отже вибір моделі для дослідження ЕЕ є складною та, в певній мірі, ризикованою задачею.

В умовах ринкової економіки на результативність споживання ЕЕ впливає ряд зовнішніх та внутрішніх чинників. Особливо значний вплив здійснюють чинники достатності фінансування діяльності залізорудних підприємств, витрати на модернізацію обладнання, споживання ЕЕ тощо, оцінити результати дії яких стає можливо, використовуючи економіко-статистичні методи. Застосування даних методів полягає у проведенні глибинного аналізу досліджуваних статистичних показників та на основі отриманих результатів побудови математичної моделі.

Велика кількість факторних величин обумовлює необхідність застосовування саме методів множинного кореляційно-регресійного аналізу, які дозволяють виокремлювати найбільш статистично значимі фактори та оцінити взаємозв'язок їх з результативною ознакою, який в результаті представлений у вигляді певного числового виразу.

Природно, що лише одні показники результативності споживання ЕЕ водовідливними комплексами являють собою велику статистичну сукупність. Тобто існує доцільність застосування відповідних економіко-математичних методів та програмних комплексів. Ігнорування такої вимоги може призвести до отримання не лише недостовірних результатів, а й неадекватної математичної моделі.

Як показує практика, одним з найефективніших економіко-статистичних методів щодо виявлення впливу найбільш значущих факторів на результативну ознаку є кореляційно-регресійний аналіз. Таким чином, виникає об'єктивна необхідність у побудові та послідовному аналізі відповідної адекватної математичної моделі.

Результати аналізу споживання ЕЕ в умовах ринкової економіки формуються під впливом багатьох факторів, вплив яких можна виразити за допомогою економіко-статистичних методів.

Між тим, сучасний стан інформаційної забезпеченості створює передумови для широкого застосування багатфакторних моделей з метою встановлення взаємозв'язків між результативною ознакою та основними факторами.

З метою дослідження якісної та кількісної оцінки внутрішніх та зовнішніх взаємозв'язків між результативною ознакою та обраними факторами, доцільно застосовувати саме кореляційно-регресійний аналіз, основне завдання якого полягає у аналізі наявних статистичних даних між досліджуваними ознаками з послідовним встановленням щільності взаємозв'язку за допомогою розрахованих коефіцієнтів кореляції.

Для проведення множинного кореляційно-регресійного аналізу та враховуючи набір факторів, що були обрані, можлива побудова лінійного рівняння множинної регресії, оскільки між результативною ознакою та факторними показниками лежить лінійний зв'язок:

$$\hat{Y} = a_0 + a_1 * X_1 + a_2 * X_2 + \dots + a_n * X_n.$$

Множинна регресія - це рівняння зв'язку з декількома незалежними змінними [126]:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_m) + \varepsilon$$

де y – результатний, функціональний показник (залежна змінна);

$x_1, x, \dots, x_m$ – факторні показники, чинники, які визначають величину результатного показника (незалежні змінні).

Оцінювання параметрів рівняння множинної регресії застосовують метод найменших квадратів. Для лінійних рівнянь:

$$y = a + b_1 * x_1 + b_2 * x_2 + \dots + b_m * x_m + \varepsilon$$

будується наступна система нормальних рівнянь, рішення якої дозволяє отримати оцінки параметрів регресії:

$$\left\{ \begin{array}{l} r_{yx1} = \beta_1 + \beta_2 r_{x1x2} + \beta_3 r_{x1x3} + ... + \beta_m r_{x1xm} \\ r_{yx2} = \beta_1 r_{x1x2} + \beta_2 + \beta_3 r_{x1x3} + ... + \beta_m r_{x1xm} \\ \\ r_{yxm} = \beta_1 r_{x1xm} + \beta_2 r_{x1xm} + \beta_3 r_{x1xm} + ... + \beta_m \end{array} \right.$$

де r_{yx_i} та $r_{x_i x_i}$ – коефіцієнти парної та міжфакторної кореляції.

Значення коефіцієнти «чистої» регресії b_i пов'язані зі значеннями стандартизованих коефіцієнтів регресії β_i наступним чином:

$$b_i = \beta_i \cdot \frac{\sigma_y}{\sigma_{x_i}}.$$

Тому можна переходити від рівняння регресії в стандартизованому масштабі до рівняння регресії в натуральному масштабі змінних, при цьому параметр a визначається як:

$$a = \bar{y} - b_1 * \bar{x}_1 - b_2 * \bar{x}_2 - \dots - b_m * \bar{x}_m \quad (2.37)$$

Розглянутий сенс стандартизованих коефіцієнтів регресії дозволяє їх використовувати при відсіві факторів – з моделі виключаються фактори з найменшим значенням β_i .

Середні коефіцієнти еластичності для лінійної регресії розраховуються за формулою:

$$\bar{C}_{yx_j} = \beta_j \cdot \frac{\bar{x}_j}{\bar{y}}. \quad (2.38)$$

Значення коефіцієнтів вказують на скільки відсотків в середньому зміниться результат, при переміні значення відповідного фактору на 1%. Значення середніх показників еластичності можна порівнювати один з одним і відповідно ранжувати фактори за силою їх впливу на результат.

Тісноту спільного впливу чинників на результат оцінює індекс множинної кореляції:

$$R_{yx_1x_2\dots x_m} = \sqrt{1 - \frac{1 - \sigma_{yocm}^2}{1 - \sigma_y^2}}. \quad (2.39)$$

Значення індексу множинної кореляції міститься у межах від 0 до 1 і необхідно щоби були більше або дорівнювати максимальному парному індексом кореляції:

$$R_{yx_1x_2\dots x_m} \geq r_{yx_i} \quad (i = \overline{1, m})$$

При лінійній залежності коефіцієнт множинної кореляції можна визначити через матриці парних коефіцієнтів кореляції:

$$R_{yx_1x_2\dots x_m} = \sqrt{1 - \frac{\Delta r}{\Delta r_{11}}}, \quad (2.40)$$

$$\text{де } \Delta r = \begin{vmatrix} 1 & r_{yx1} & r_{yx2} & \dots & r_{yxm} \\ r_{yx1} & 1 & r_{x1x2} & \dots & r_{x1xm} \\ r_{yx2} & r_{x2x1} & 1 & \dots & r_{x2xm} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{yxm} & r_{xmx1} & r_{xmx2} & \dots & 1 \end{vmatrix} - \text{визначник матриці даних коефіцієнтів кореляції};$$

$$\Delta r_{11} = \begin{vmatrix} 1 & r_{x1x2} & \dots & r_{x1xm} \\ r_{x2x1} & 1 & \dots & r_{x2xm} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{xmx1} & r_{xmx2} & \dots & 1 \end{vmatrix} - \text{визначник матриці між факторної кореляції}.$$

Зазначимо, що при лінійній залежності ознак аналітичний вираз коефіцієнта множинної кореляції може бути представлений наступною формулою:

$$R_{yx_1x_2\dots x_m} = \sqrt{\sum \beta_i} \cdot r_{yx_i}, \quad (2.41)$$

де β_i – стандартизовані коефіцієнти регресії,

r_{yx_i} – парні коефіцієнти кореляції результату з кожним фактором.

Якість побудованої моделі в цілому оцінює коефіцієнт (індекс) детермінації. Коефіцієнт множинної детермінації розраховується як квадрат індексу множинної кореляції.

Для того щоб більш адекватно охарактеризувати тісноту зв'язку, застосовується скоригований індекс множинної детермінації, який включає поправку на число ступенів свободи і визначається за формулою:

$$\hat{R}^2 = 1 - (1 - R^2) \cdot \frac{(n-1)}{(n-m-1)}, \quad (2.42)$$

де n – число спостережень;

m – число факторів.

При незначному числі спостережень нескоректоване значення коефіцієнта множинної детермінації R^2 має тенденцію переоцінювати частку варіації результативної ознаки. Як відомо, ця частка пов'язана з впливом факторів, що включені в побудовану регресійну модель.

Приватні коефіцієнти (або індекси) кореляції, що вимірюють вплив на y фактору x_i , при елімінуванні (виключення впливу) інших факторів, можна визначити за формулою:

$$r_{yx_1 \cdot x_1 x_2 \dots x_{i-1} x_{i+1} \dots x_m} = \sqrt{1 - \frac{1 - R_{yx_1 \cdot x_1 x_2 \dots x_m}^2}{1 - R_{yx_1 \cdot x_{i-1} x_{i+1} \dots x_m}^2}} \quad (2.43)$$

або за рекурентною формулою:

$$\begin{aligned} r_{yx_1 \cdot x_1 x_2 \dots x_{i-1} x_{i+1} \dots x_m} &= \\ &= \frac{r_{yx_1 \cdot x_1 x_2 \dots x_{i-1} x_{i+1} \dots x_{m-1}} - r_{yx_m \cdot x_1 x_2 \dots x_{m-1}} \cdot r_{x_1 x_m \cdot x_1 x_2 \dots x_{i-1} x_{i+1} \dots x_{m-1}}}{\sqrt{(1 - r_{yx_m \cdot x_1 x_2 \dots x_{m-1}}^2) \cdot (1 - r_{x_1 x_m \cdot x_1 x_2 \dots x_{i-1} x_{i+1} \dots x_{m-1}}^2)}} \end{aligned} \quad (2.44)$$

Розраховані за рекурентною формулою приватні коефіцієнти кореляції змінюються в межах від -1 до +1, а за формулами через множинні коефіцієнти детермінації – від 0 до 1. Порівняння їх один з одним дозволяє ранжувати фактори

за тісноти їх зв'язку з результатом. Приватні коефіцієнти кореляції дають міру тісноти зв'язку кожного фактору з результатом в чистому вигляді.

Значимість рівняння множинної регресії в цілому оцінюється за допомогою F-критерію Фішера:

$$F = \frac{R^2}{1 - R^2} \cdot \frac{n - m - 1}{m}. \quad (2.45)$$

Приватний F-критерій оцінює статистичну значущість присутності кожного з факторів у рівнянні. У загальному вигляді для фактору x приватний F-критерій визначиться як:

$$F_{x_i} = \frac{R^2_{yx_1x_2\dots x_m} - R^2_{yx_1x_{j-1}x_{j+1}\dots x_m}}{1 - R^2_{yx_1x_2\dots x_m}} \cdot \frac{n - m - 1}{1}. \quad (2.46)$$

Порівнюється фактичне значення приватного F-критерію з табличним при рівні значущості α і числі ступенів свободи: $k_1 = 1$, $k_2 = n - m - 1$. Включення фактору x_i в побудовану модель виправдано. Тобто, коефіцієнт чистої регресії b_i при факторі x_i статистично значущий, якщо фактичне значення F_{x_i} перевищує F табл. (α, k_1, k_2).

Коефіцієнт регресії статистично незначущий при даному факторі, якщо F_{x_i} менше табличного. Тобто додаткове включення в модель фактору x_i не збільшує істотно частку поясненої варіації ознаки y . Таким чином, недоцільно включення в модель.

Оцінка значущості коефіцієнтів чистої регресії проводиться за t-критерієм Стюдента. У цьому випадку, як і в парній регресії, для кожного фактору використовується формула:

$$t_{b_i} = \frac{b_i}{m_{b_i}}. \quad (2.47)$$

Для рівняння множинної регресії середня квадратична помилка коефіцієнта регресії може бути визначена за формулою:

$$m_{b_i} = \frac{\sigma_y \cdot \sqrt{1 - R_{yx_1x_2\dots x_m}^2}}{\sigma_{x_i} \cdot \sqrt{1 - R_{x_1x_2\dots x_m}^2}} \cdot \frac{1}{\sqrt{n - m - 1}}, \quad (2.48)$$

де $R_{x_1x_2\dots x_m}^2$ – коефіцієнт детермінації для залежності фактору x_i з усіма іншими факторами рівняння множинної регресії.

Існує зв'язок між t -критерієм Стюдента і приватним F -критерієм Фішера:

$$|t_{b_i}| = \sqrt{F_{x_i}} \quad (2.49)$$

Рішення про достовірність відмінностей приймають у тому разі, якщо обчислена величина t перевищує табличне значення для певної кількості ступенів свободи. У публікаціях або наукових звітах вказують найвищий рівень значущості з трьох: $p < 0,05$; $p < 0,01$; $p < 0,001$.

За будь-якого числового значення критерію достовірності відмінності між середніми цей показник оцінює не ступінь виявленої відмінності (її оцінюють за самою різницею між середніми), а лише його статистичну достовірність, тобто право поширювати отриманий на основі зіставлення вибірок висновок про наявність різниці на все явище (весь процес) загалом. Низький обчислений критерій відмінності не може бути доказом відсутності відмінності між двома ознаками (явищами), бо його значущість (ступінь вірогідності) залежить не тільки від величини середніх, а й від кількості порівнюваних вибірок. Він вказує не на відсутність відмінності, а на те, що за такої величини вибірок вона статистично недостовірна: дуже великий шанс, що різниця за цих умов випадкова, дуже мала вірогідність її достовірності.

На основі розрахованих показників адекватності моделі знаходять несуттєві факторні ознаки та відкидають їх. Таким чином, будують нову модель с суттєвими факторними ознаками, розрахувавши попередньо для неї нові оцінки параметрів регресії. На основі нової сформованої моделі формують висновки про вплив ознак на результуючий показник.

Оцінювання споживання ЕЕ залізорудними підприємства - необхідний етап аналізу роботи ГВК та відповідного управління. Пропонована методика розрахунку охоплює основні внутрішні процеси споживання ЕЕ, що протікають у внутрішньому середовищі залізорудного підприємства взагалі та водовідливних установках зокрема. В результаті забезпечується системний погляд на споживання ЕЕ, який дозволить виявити всі сильні і слабкі сторони, а також запровадити на цій основі оптимальні зони споживання ЕЕ.

У динамічній конкурентній економіці процес споживання ЕЕ, у вирішальній мірі залежить від якості інформаційно-аналітичного забезпечення. Розвиток ринкових відносин, формування нової структури власності, зміна системи управління потребують формування адекватного цим змінам інформаційного забезпечення щодо споживання ЕЕ, де головна роль належить загальним кількісним показникам, які є підґрунтям щодо оптимального споживання ЕЕ залізорудними підприємствами взагалі та водовідливними комплексами зокрема.

Відповідно до приведеної методики проведемо розрахунки щодо водовідливних установок на залізорудних підприємствах.

Розділимо всю роботу на частини, розглянувши систему статистичних показників споживання ЕЕ:

1. Моделювання системи показників щодо споживання водовідливними комплексами ш. Тернівська (м. Кривий Ріг).

1.1. Сформуємо систему вихідних даних (табл.2.1) та таблицю проміжних розрахунків

Таблиця 2.1 – Система вихідних даних водовідливними комплексами
ш. Тернівська (м. Кривий Ріг)

Рік	кВт/год.	м ³ /год.	Горизонт, м	Потужність насосу, кВт	Кількість насосів, шт.
	Y	X_1	X_2	X_3	X_4
2014	3268,88	177,8	527	800,00	2,00
2015	4904,88	171,6	1050	800,00	3,00
2016	5920,88	175,9	1200	250,00	3,00
2017	10228,69	176,4	1350	315,00	3,00
2018	14609,02	169,8	1350	315,00	3,00
2019	11807,13	158,8	1350	315,00	3,00
2020	12897,05	164,1	1350	315,00	3,00

Виділимо показники по яким будуть здійснюватися розрахунки: Y – обсяг споживання ЕЕ кВт/год., X_1 – водоприплив; X_2 – горизонт, м; X_3 – потужність насосу, кВт; X_4 – кількість насосів, шт.

Знайдемо середні квадратичні відхилення ознак:

$$\sigma_y = 4,74; \sigma_{x_1} = 0,58; \sigma_{x_2} = 2,26; \sigma_{x_3} = 1,56;$$

Знаходимо коефіцієнти чистої регресії:

$$a = 1315,48; b_1 = 11,94; b_2 = - 0,184; b_3 = - 1,99; b_4 = 9,31.$$

Таким чином, отримали наступне рівняння множинної регресії:

$$\hat{y} = 1315,48 + 11,94 * x_1 - 0,184 * x_2 - 1,99 * x_3 + 9,31 * x_4$$

Рівняння регресії показує, що при збільшенні водоприпливу на 1% (при незмінному рівні питомої ваги інших факторів) обсяг споживання ЕЕ збільшиться на 11,94 кВт·год.

Після знаходження рівняння регресії формуємо нову розрахункову таблицю задля отримання теоретичних значень середньої помилки апроксимації, результативної ознаки, остаточної дисперсії (табл. 2.2).

Таблиця 2.2 – Система скоригованих даних ш. Тернівська (м. Кривий Ріг)

Рік	Y	Y'	Y-Y'	(Y-Y') ²	A _i , %
2009	713,93	1677,46	-963,53	928397,14	134,96
2010	780,07	1566,98	-786,91	619233,71	100,87
2011	1844,93	1393,87	451,05	203455,1	24,44
2012	3339,28	3811,41	-472,13	222913,47	14,13
2013	3113,22	2179,77	933,44	871315,74	29,98
2014	3268,88	3630,87	-361,99	131036,97	11,07
2015	4904,88	4470,29	434,58	188867,6	8,86
2016	5920,88	6637,32	-716,44	513291,28	12,1
2017	10228,69	9052,31	1176,39	1383894,1	11,5
2018	14609,02	16082,11	-1473,09	2169997,9	10,08
2019	11807,13	12021,79	-214,66	46080,7	1,81
2020	12897,05	10903,75	1993,29	3973212,4	15,45
Сума	73427,99	73427,99	4,96811 ⁻¹⁰	11251696	375,31
Середнє значення	6118,99	6118,99	4,1401 ⁻¹¹	937641,35	3,12

$$\sigma_{\text{ост}}^2 = 0,93; \bar{A} = 3.127.$$

Якість моделі, на основі розрахованих відносних відхилень по кожному спостереженню, може бути визнана хорошою, тому як середня помилка апроксимації не перевищує 10%. Відповідно до значення показника остаточної дисперсії ступінь впливу випадкових факторів є низькою.

Знаходимо стандартизовані коефіцієнти рівняння регресії:

$$\beta_1 = 1.456; \beta_2 = -0.087; \beta_3 = -0.655; \beta_4 = 0.337.$$

Тобто рівняння буде виглядати наступним чином:

$$\hat{t}_y = 1.456 * t_{x_1} - 0.087 * t_{x_2} - 0.655 * t_{x_3} + 0.337 * t_{x_4}.$$

Так як можна порівнювати стандартизовані коефіцієнти регресії між собою, то можна стверджувати, що водоприплив здійснює найбільший вплив на обсяг виробництва, а глибина горизонту – найменший.

Порівнювати вплив факторів на результат можна також за допомогою середніх коефіцієнтів еластичності:

$$\overline{\epsilon}_1 = 0,569; \overline{\epsilon}_2 = 0,115; \overline{\epsilon}_3 = 0,532; \overline{\epsilon}_4 = 0,086.$$

Знову підтверджується найбільший вплив першого фактору – водоприплив, та найменший вплив – глибина горизонту на споживання ЕЕ.

1.2. Знайдемо частині коефіцієнти кореляції, що характеризують тісноту зв'язку між результатом і відповідним фактором при елімінуванні (усуненні впливу) інших факторів, включених у рівняння регресії (табл. 2.3).

Таблиця 2.3 – Частині коефіцієнти кореляції для показників водовідливних установок ш Тернівська (м. Кривий Ріг)

	Y	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄
Y	1				
X ₁	0,881	1			
X ₂	-0,272	-0,114	1		
X ₃	0,144	0,546	0,309	1	
X ₄	-0,755	-0,674	0,546	0,096	1

Коефіцієнт множинної кореляції визначаємо через матриці парних коефіцієнтів кореляції:

$$R_{yx_1x_2x_3x_4} = 0,978.$$

Коефіцієнт множинної кореляції вказує на вельми сильний зв'язок усього набору факторів з результатом.

1.3. Значення нескоригованого коефіцієнта множинної детермінації характеризує частку дисперсії результату за рахунок представлених в рівнянні регресії факторів. Значення частки становить 97,8% і вказує на досить високий ступінь обумовленості варіації щодо результату варіації факторів. Тобто існує вельми тісний зв'язок факторів з результатом.

Скоригований коефіцієнт множинної детермінації:

$\widehat{R^2} = 0,934$ – визначає тісноту зв'язку з урахуванням ступенів свободи загальної та залишкової дисперсій. Характеризує оцінку тісноти зв'язку, яка не залежить від числа факторів. Тобто, значення може застосовуватися для порівняння за різними моделями з різним числом факторів. Обидва коефіцієнти вказують на досить високу детермінованість результату у в моделі факторами.

1.4. Оцінку надійності рівняння регресії в цілому і показника тісноти зв'язку дає F -критерій Фішера:

$$F = 40,18; F_{\text{табл}} = 4,12 \text{ при } f_1 = 4, f_2 = 7.$$

Отримали, що фактичне значення більше табличного, отже ймовірність випадково отримати таке значення F -критерію не перевищує допустимий рівень значимості 5 %. Отже, отримане значення не випадкове, воно сформувалося під впливом істотних факторів, тобто підтверджується статистична значимість всього рівняння і показника тісноти зв'язку.

1.5. Оцінимо статистичну значущість параметрів чистої регресії за допомогою t -критерію Стюдента.

$$t_{b_1} = 0.159; t_{b_2} = 2.158; t_{b_3} = 3.431; t_{b_4} = 8.051;$$

$$t_{\text{табл}} = 2.3646 \text{ при } f = 7, p = 0.95.$$

Розрахункові значення критеріїв t_{b_2}, t_{b_3} та t_{b_4} більше табличного, а отже параметри b_2, b_3, b_4 – статистично значимі, тоді як значення критерію t_{b_1} менше табличного, а отже параметр b_1 має випадкову природу формування.

Будуємо довірчі інтервали:

$$\begin{array}{lll} 11,963 & \leq b_1 \leq & 12,025; \\ -27,882 & \leq b_2 \leq & 27,514; \\ -6,0588 & \leq b_3 \leq & 2,062; \\ 7,2573 & \leq b_4 \leq & 11,349. \end{array}$$

1.6. На основі приватних F -критеріїв Фішера оцінимо доцільність включення в рівняння множинної регресії факторів x_1, x_2, x_3, x_4 :

$$F_{x_1} = 0,025; F_{x_2} = 4,658; F_{x_3} = 11,775; F_{x_4} = 64,822; F_{\text{табл}} = 4,12 \text{ при } f_1 = 4, f_2 =$$

7.

Виключаємо із розгляду перший фактор, оскільки він є неінформативним (тобто розрахункове значення приватного F -критерію менше табличного).

1.7. Будуємо нову модель. Для цього сформуємо нову таблицю вихідних даних (табл. 2.4).

Таблиця 2.4 – Оновлена таблиця вихідних даних ш. Тернівська (м. Кривий Ріг)

Рік	Y	X_2	X_3	X_4
2009	713,93	3966,06	6108,27	709,10
2010	780,07	4821,09	6963,87	740,00
2011	1844,93	7430,61	6366,10	728,00
2012	3339,28	8947,83	2951,87	728,90
2013	3113,22	1447,36	2723,92	546,89
2014	3268,88	1519,72	2860,11	574,23
2015	4904,89	2154,78	3188,10	469,62
2016	5920,89	2366,78	3338,10	719,62
2017	10228,70	3049,93	4430,73	379,45
2018	14609,03	1818,99	5308,26	144,17
2019	11807,14	4217,96	5478,56	491,09
2020	12897,05	4235,99	6607,05	582,75
Сума	73427,99	45977,10	56324,94	6813,82
Середнє значення	6119,00	3831,42	4693,75	567,82

Знаходимо коефіцієнти чистої регресії:

$$a = 15632,34; b_2 = 0,277; b_3 = 0,559; b_4 = -23,254.$$

Отже, маємо нове рівняння:

$$\hat{y} = 15632,34 + 0,277 * x_2 + 0,559 * x_3 - 23,254 * x_4.$$

Тобто, збільшення факторної ознаки глибини горизонту на 1% призведе до збільшення обсягу споживання ЕЕ на 0,277.

Часткові коефіцієнти кореляції становлять:

$$r_{yx_2}=0.272; r_{yx_3}=0.143; r_{yx_4}=0.656.$$

Згідно шкали Чеддока найбільш помітна сила зв'язку присутня між фактором X_4 та Y , слабкий зв'язок між факторами X_2 та Y , X_3 та Y .

Аналогічна методика моделювання застосована відповідно для підприємств ш. Криворізька, ш. Покровська; ш. Козацька (м. Кривий Ріг). (Додаток А).

Серед складових щодо оптимального забезпечення споживання ЕЕ виділяють оцінювання рівня якості, що відповідно може виражатися вартісними показниками. При оптимізації критерій оптимальності формується деяка цільова функція безлічі приватних критеріїв, яка називається функцією якості і характеризує придатність об'єкту задовольняти певні потреби відповідно до призначення. Вважаємо, що така функція існує і є безперервною функцією багатьох змінних, яка не зменшується при збільшенні значень приватних критеріїв. Вважатимемо також, що критерії незалежні і вплив їх на узагальнений критерій має лінійний характер. Тоді стає можливим представлення функції в лінійній адитивній формі

$$W(\varpi) = \sum_{j=1}^m \varpi_j \nu_j, \quad (2.50)$$

де $\nu_j = \frac{\partial W}{\partial \varpi_j} = \frac{\partial W}{\partial p_j} p_{j0}$ – параметр, що характеризує чутливість оцінки відповідного критерію до варіацій відповідних частинних критеріїв навколо деякої точки $p_0 = (p_{10}, \dots, p_{m0})$, узятій за початкову для порівняння.

Складові

$$\varpi_j = \frac{p_j - p_{j0}}{p_{j0}}, \quad (2.51)$$

де $p_{j0} \geq p_j$ характеризують зниження по кожному з j -х критеріїв.

Вектор $p_0 = (p_{10}, \dots, p_{m0})$ – ідеальне рішення, для якого всі j -і критерії приймають як найкращі значення у області можливих їх змін. У загальному випадку таке рішення не існує і його слід розглядати як гіпотетичне, є еталоном.

Вважатимемо, що чим ближча оцінка $W(\omega)$ до еталонної $W(\omega_0) = 0$, тим краще рішення і вищий рівень якості порівнюваного об'єкту. Для встановлення міри близькості рішення до ідеального (еталонного) скористаємося принципом оптимальності, званим принципом «еквівалентної поступки». При використуванні цього принципу передбачається, що поблизу кожного локального оптимуму j -го критерію можна вказати такі Δ_j – поля (вчинки), які у однаковій мірі знижують якість рішення. Інакше кажучи, ці поступки еквівалентні по своєму впливу на величину сумарної оцінки. Тоді коефіцієнт ν_j визначає «ціну» або «вагу» поступки для j -го критерію. Ваговий коефіцієнт не однаковий для різних по значущості приватних критеріїв, оскільки він залежить від впливу кожного з критеріїв на величину сумарної оцінки.

Розглянемо спосіб знаходження вагових коефіцієнтів. Для цього представимо j -у частинну похідну через відношення приростів $\Delta W / \Delta p_j$. Прирости Δp_j визначають значення абсолютних поступок еквівалентних в значенні рівності приростів оцінок ΔW за j -м критерієм. Відповідний ряд еквівалентності $\Delta p_1 \approx \dots \approx \Delta p_n$ (де $\approx$ – еквівалентність) характеризує взаємозамінність критеріальних (споживацьких, експлуатаційних та інших) властивостей об'єкту. Еквівалентними є також і відносні прирости $\Delta_j = \Delta p_j / p_{j0}$. Тоді, вирішивши рівняння

$$\sum_{j=1}^m \frac{\Delta W}{\Delta p_j} p_{j0} = 1 \quad (2.52)$$

відносно ΔW (за умови нормування вагів $\sum_{j=1}^m v_j = 1$, одержимо наступну розрахункову формулу для вагового коефіцієнта:

$$v_j = \frac{\Delta_j^{-1}}{\sum_{j=1}^m \Delta_j^{-1}}. \quad (2.53)$$

Відзначимо, що ваговий коефіцієнт, який розраховується по даній формулі, не є прямим аналогом значущості j -го приватного критерію, оскільки величина його залежить від значення, яке приймає критерій в точці локального оптимуму, тобто від p_{j0} . Ваговий коефіцієнт приймає тим більше значення, чим менше величина відносного приросту.

Для знаходження значень поступок використовується неформальна процедура – залучаються експерти. Кожен експерт повинен вказати відношення рівноцінності ($\cong$) для пар порівнюваних критеріїв, відмінних своїми значеннями, тобто

$$\begin{pmatrix} p_{i0} - \Delta p_i \\ p_{j0} \end{pmatrix} \cong \begin{pmatrix} p_{i0} \\ p_{j0} - \Delta p_{j^*} \end{pmatrix}, \quad (2.54)$$

де Δp_{j^*} – величина зміни j -го критерію, яка компенсує різницю Δp_i . Еквівалентність приростів Δp_i і Δp_j відповідає уявленню експерта про взаємозамінність цих приростів. Процедура пошуку відношення рівноцінності пар порівнюваних критеріїв і формування відрізків еквівалентності є ітераційним процесом, описуваним у формі алгоритмічної процедури.

Практичне використання методу вимагає проведення попереднього етапу виявлення пріоритету критеріїв по перевазі зміни їх діапазонів, тобто

$$\begin{pmatrix} \overline{p_i} \\ \underline{p_j} \end{pmatrix} \begin{matrix} > \\ \cong \\ < \end{matrix} \begin{pmatrix} p_i \\ p_j \end{pmatrix} \Rightarrow \begin{matrix} 1 \\ \mathbf{0} \\ -1 \end{matrix} \quad (2.55)$$

де $\underline{p}_i(\underline{p}_j)$ і $\overline{p}_i(\overline{p}_j)$ межі діапазонів відповідних критеріїв;

знаки ($>, \cong, <$) – відносні переваги (краще, рівноцінно, гірше).

На основі встановленої таким чином системи переваг складається матриця парних порівнянь, що використовується для визначення рангів критеріїв. Вищому рангу відповідає велика сума елементів по рядках матриці. Ранг критерію визначає його місце у ряді порівнюваної послідовності пар критеріїв:

$$(p_1^1, p_2^1), (p_2^2, p_3^2), \dots, (p_j^j, p_{j+1}^j), \dots, (p_{m-1}^{m-1}, p_m^{m-1}), \quad (2.56)$$

де нижній індекс – ранг критерію, а верхній - порядковий номер пари порівняння. Таким чином, переважними для порівняння є суміжні по рангу критерії.

Після виявлення пар порівняння критеріїв необхідно виробити $m-1$ процедур пошуку відрізків еквівалентності на цих парах. З метою якнайкращої апроксимації функції один з відрізків вибирається рівним діапазону зміни критерію. В результаті складається наступна сукупність пар відрізків еквівалентності:

$$(\Delta p_1^1 \approx \Delta p_2^1), \quad (2.57)$$

$$(\Delta p_2^2 \approx \Delta p_3^2), \dots, (\Delta p_j^j, \Delta p_{j+1}^j), \dots, (\Delta p_{m-1}^{m-1}, \Delta p_m^{m-1}), \quad (2.58)$$

де Δp_{j+1}^j – діапазон зміни $(j+1)$ -го критерію,

Δp_j^j – компенсуюча різниця j -го критерію.

У загальному випадку отримання значення відрізків еквівалентності для двох суміжних членів ряду не однакові, тобто $\Delta p_j^{j-1} \neq \Delta p_j^j$. Для побудови ряду еквівалентності необхідно виробити послідовне вирівнювання відрізків. При цьому використовуються наступні перетворення:

$$\tilde{\Delta p}_j^{j-1} = \Delta p_j^j; \quad \tilde{\Delta p}_{j-1}^{j-1} = \Delta p_{j-1}^{j-1} \left(\frac{\Delta p_j^j}{\Delta p_j^{j-1}} \right). \quad (2.59)$$

Знайдений в результаті вирівнювання ряд еквівалентності

$$\tilde{\Delta}p_1 \approx \tilde{\Delta}p_2 \approx \dots \approx \tilde{\Delta}p_m$$

є початковим для розрахунку вагових коефіцієнтів.

Оцінювання полягає в зіставленні проектних або фактичних значень показників споживання ЕЕ з базовими, прийнятими за основу при порівнянні. У тих випадках, коли не всі показники варіанту, що оцінюється кращі базових, виникає проблема комплексної оцінки, тобто за допомогою одного узагальненого критерію. При проведенні порівняльної оцінки варіантів замість оптимальних значень p_{j0} виступають якнайкращі значення показників для сукупності даних варіантів. Раніше передбачалося, що якнайкращій показник споживання ЕЕ відповідає найбільше значення j -го критерію. Практично існують показники, для яких якнайкращій показник відповідає якнайменше значення критерію.

Якщо є варіанти оцінювання, то величина різниці $\Delta W = W_1 - W_2$ (W_1 і W_2 – оцінки двох варіантів) показує, на скільки рівень якості одного варіанту кращий (позитивний знак) або гірше (негативний знак) за інший критерій. Часто буває необхідне визначити, в скільки разів оцінюваний варіант краще або гірше за який-небудь інший варіант. Величина відносного показника $\Delta_{ВІДН}$ перераховується з різницевої оцінки по формулах:

$$\Delta_{ВІДН} = 1 + \Delta W, \text{ якщо } \Delta W \geq 0; \quad (2.60)$$

$$\Delta_{ВІДН} = \frac{1}{1 - \Delta W}, \text{ якщо } \Delta W \leq 0. \quad (2.61)$$

В цьому випадку оцінки приймають значення, більше одиниці, якщо оцінюваний варіант кращий за варіант, вибраний для порівняння, і менші одиниці (завжди позитивні) – інакше.

Методична основа аналізу ефективності споживання ЕЕ – порівняння результатів використання двох варіантів. Тому при розрахунках зіпівставляють варіанти, виявляють чинники впливу на результат, включаючи кількісні і якісні

параметри. Дотримання правила зіпівставлення порівнюваних варіантів – основна умова достовірності розрахунків споживання ЕЕ.

Слід зазначити, що експертне оцінювання щодо споживання ЕЕ – дороговартісний, процес, що складно реалізується.

Не можна обійти увагою вартісні показники щодо споживання ЕЕ ГВУ. Споживання ЕЕ в години максимуму, коли енергія має максимальну вартість, зменшується і зменшується плата за електроенергію. Може бути також покращений режим роботи системи електропостачання: знижені втрати напруги і енергії, вдосконалений коефіцієнт

$$E_v = \rho g W (Z_1 - Z_2) + W (P_1 - P_2) + 0,5 \rho W (\beta_1 v_1^2 - \beta_2 v_2^2)$$

де E_v – енергія водотоку на виділеній ділянці, Дж;

t – час, с;

g – прискорення вільного падіння м/с,

ρ – густина рідини, кг/м, для водотоків з чистою прісною водою $\rho = 1000$ кг/м,

W – обсяг стоку води, м,

Z_1 і Z_2 – геометрична висота над площиною порівняння в горизонтах, м;

P_1 і P_2 – тиск в перетинах горизонтів, Па;

v_1 і v_2 – середня швидкість води в горизонтах, м/с;

ρ – коефіцієнт кінетичної енергії (Коріоліса).

Таким чином потужність протоку води водовідливу можна визначити з формули:

$$N = \frac{E_v}{I}.$$

Ці висновки будуть використані в подальшому дисертаційному дослідженні.

Маючи вхідну статистичну інформацію щодо споживання ЕЕ водовідливними комплексами вважаємо за доцільне провести узагальнюючий аналіз.

На графіках візуально представлено складові-характеристики роботи водовідливних установок, а саме кількість спожитої ЕЕ, вартість ЕЕ відповідно за двозонним та тризонним тарифами (рис. 2.1).

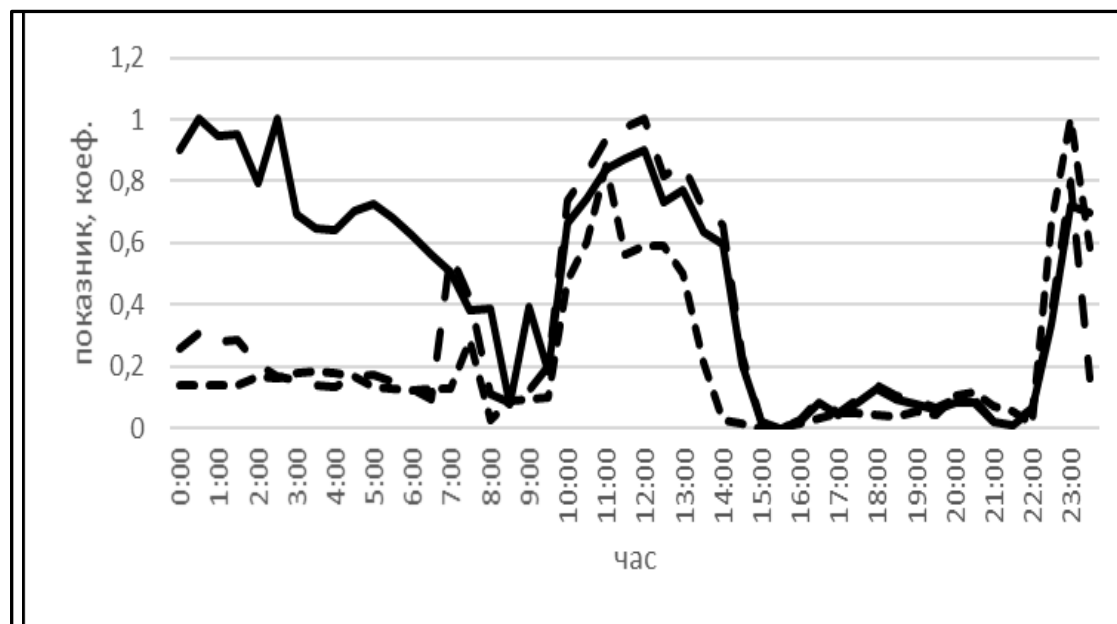


Рисунок 2.1 – Споживання та вартість споживання електричної енергії водовідливним комплексом ш. Криворізька (м Кривий Ріг)

Характерним є максимальне споживання ЕЕ в період часу з 0.00 по 6.00, та 10.00 по 14.00; 22.30 -23.00. Відповідно вартість споживання найбільша в період часу з 10.00 до 14.00 та 22.30-23.00 – за двозонним та тризонним тарифами. Загальна добова вартість споживання за двозонним тарифом перевищує вартість споживання за тризонним тарифами (рис. 2.2).

Статистична інформація відповідно до споживання та вартості ЕЕ за двозонним та тризонним тарифами дає підстави дійти наступних висновків; найбільше споживання ЕЕ відповідає періоду часу з 11.00 по 12.30 та з 22.30 по 23.30. Цим же періодам доби відповідає й найбільша вартість ЕЕ, як за двозонним та тризонним тарифами. Загальна добова вартість споживання за двозонним тарифом перевищує вартість споживання за тризонним тарифами (рис. 2.3).

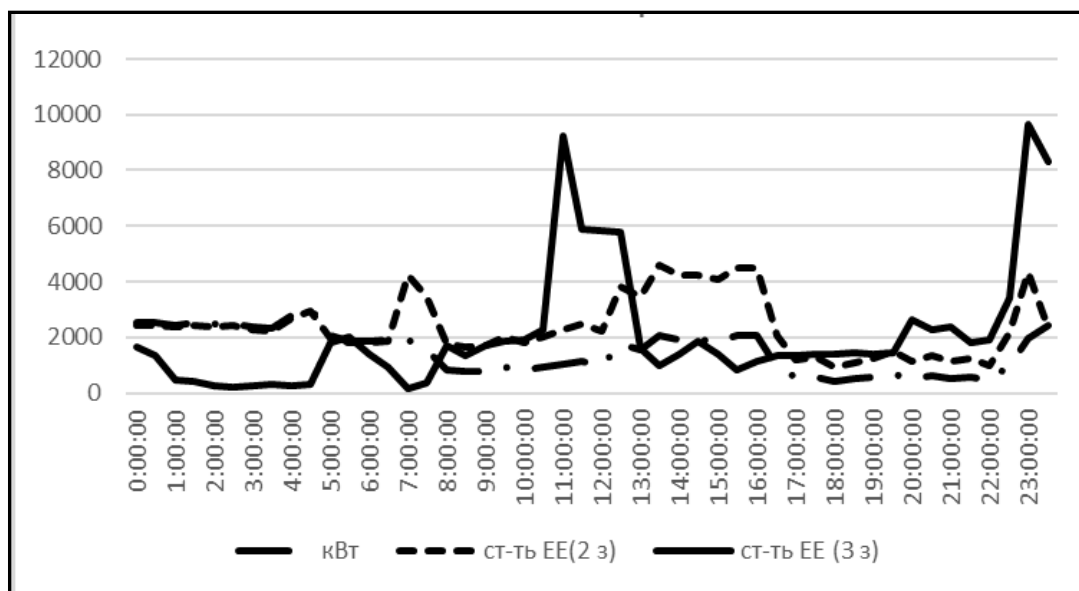


Рисунок 2.2 – Споживання та вартість електричної енергії водовідливним комплексами ш. Тернівська (м. Кривий Ріг)

Візуальний аналіз графіка свідчить про найбільше споживання ЕЕ в період часу з 0.00 по 5.00 та з 23.00 по 23.30. Але найбільше вартість ЕЕ за двозонним та тризонним тарифами відповідає періоду часу з 13.00 по 15.00 та з 22.30 по 23.30. Загальна добова вартість споживання за двозонним тарифом перевищує вартість споживання за тризонним тарифами.

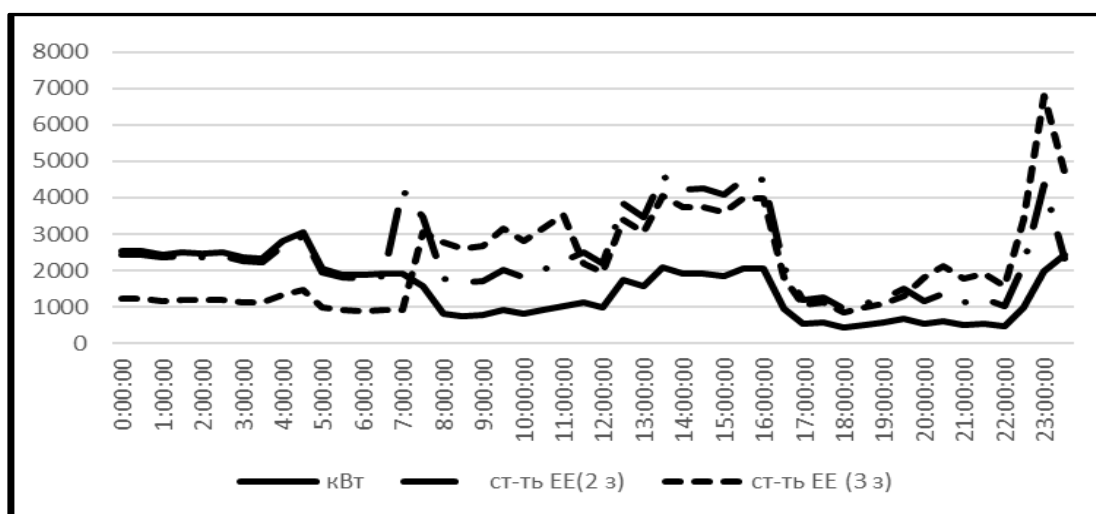


Рисунок 2.3 – Споживання та вартість споживання електричної енергії водовідливним комплексами ш. Козацька (м. Кривий Ріг)

Візуальний аналіз графіка свідчить про найбільше споживання ЕЕ в період часу з 0.00 по 5.00 та з 23.00 по 23.30. Але найбільше вартість ЕЕ за двозонним та тризонним тарифами відповідає періоду часу з 13.00 по 15.00 та з 22.30 по 23.30. Загальна добова вартість споживання за двозонним тарифом перевищує вартість споживання за тризонним тарифами.

Проведене попереднє дослідження дає підстави стверджувати, що не існує загально науково-технічно обґрунтування оптимального розподілення споживання ЕЕ щодо установок водовідведення. Загальним для всіх залізорудних підприємств, що досліджувались є – добова вартість споживання за двозонним тарифом перевищує вартість споживання за тризонним тарифами. Кожне окреме підприємство здійснює споживання ЕЕ відповідно до індивідуальних технічних потреб, не проводячи відповідних прогнозованих досліджень, що є запорука зменшення вартісних показників споживання ЕЕ. Такі дослідження повинні лягти в основу загально наукового підходу щодо оптимізації вартісно-цільових показників споживання ЕЕ шахтними водовідливними комплексами. З послідуочим прийняттям конкретних варіантів пошуку.

2.4 Висновки до розділу 2

1. Досліджено рівень ефективності функціонування головних водовідливних комплексів залізорудних шахт за добовими плановими тарифами. Інформація щодо споживання електричної енергії залізорудними шахтами вказує на складність аналізу отриманих результатів. Запропоновано інноваційний підхід щодо використання статистичного матеріалу відповідних показників електроспоживання відповідної вартості, водоприпливу, глибини горизонту, кількості насосів та їх потужності, синтезувавши математичні моделі як складних об'єктів шляхом більш глибокого опрацювання статистичного матеріалу з обґрунтуванням отриманих результатів.

2. Вперше застосовані багатофакторні регресійні моделі з урахуванням мультиколінеарності та нелінійності за величиною потужності насосів для дослідження впливу потужності насосів на вартість спожитої електричної енергії шляхом використання коефіцієнта еластичності. Аналіз результатів математичного моделювання відповідно щодо статистичного матеріалу із застосуванням алгоритму дослідження залежності вартості спожитої електричної енергії від потужності насосів показав наявність критичних величин, які якісно змінюють відповідний вплив, що дозволяє визначити найбільш перспективні тенденції розвитку водовідливних комплексів залізрудних шахт та забезпечити раціональне управління процесами енергоефективності.

3. Відповідно до запропонованої методики побудована та проаналізована множинна кореляційно-регресійної модель режимів електроспоживання електромеханічними комплексами водовідливними комплексами шахт. Установлено, що найбільший вплив на споживання ЕЕ становить фактор водоприпливу, а найменший глибина підземного горизонту. Визначено, що при збільшенні водоприпливу на 1% (при незмінному рівні питомої ваги інших факторів) обсяг споживання ЕЕ збільшиться на 11,94%. Використання запропонованої моделі дозволить визначити оптимальний рівень факторів впливу на споживання ЕЕ та запропонувати відповідні техніко-аналітичні рішення проблем, що можуть виникнути при роботі водовідливних комплексів шахт.

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБКА АВТОМАТИЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ВІДВЕДЕННЯ ВОД З ПІДЗЕМНИХ ГОРИЗОНТІВ ЗАЛІЗОРУДНИХ ШАХТ ЯК ПІДСИСТЕМИ КОМПЛЕКСНОЇ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ АСК «ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ-ЕЛЕКТРОЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ»

3.1 Передумови застосування підходу та постановка завдання

Як зазначено в першому розділі даного дослідження, досяжність бажаного рівня енергоефективності гірничовидобувних підприємств можливо на платформі комплексної інтелектуальної «АСК енергопостачання-електроспоживання»*.

Згідно з раніше викладеними результатами досліджень автора [12, 24-29, 48, 53] стверджувалось, що керувати локально лише одним процесом, та/або обмеженою кількістю енергоємних складових виробництв технологічного комплексу залізорудної шахти не є доцільним та ефективним рішенням. Достатньо ефективним та логічним є рішення щодо системного врахування всіх управлінських рішень окремих споживачів в формат розбудови узагальненої структури АСК з врахуванням усього комплексу параметрів їх впливу на загальну технологію функціонування та формування відповідних керуючих рішень (Додаток В).

Відповідно до цього в працях [12, 24-27, 48], в тому числі за участі автора [27, 29, 30, 53] викладено варіант загальної структури «АСК енергопостачання-електроспоживання». Визначено і те, що локальне керування електроенергетичними процесами функціонування ГВК повинно здійснюватися сегментально в межах підсистеми управління цим комплексом на платформі загальної інтелектуальної АСК. Безумовно можна стверджувати, що від рівня

* В подальшому в тексті в скороченому варіанті наводиться абривіатура «АСК»

такого впливу керування залежить і якість прийняття кінцевого рішення з досяжності міри його ефективності. Тому саме в такому напрямі й структурувався дослідницький процес, результати якого викладені в подальших розділах цієї роботи.

3.2 Формалізація завдань автоматизованого керування процесом водовідведення в умовах залізрудних шахт

В попередніх розділах даної роботи обґрунтовано структуру та базові засади щодо створення АСК технологічним та електроенергетичним процесом ГВК залізрудних шахт згідно їх індивідуальної специфіки як виду підприємств з підземними способами видобутку корисних копалин.

При цьому, згідно логіки наукового мислення та результатів ряду наукових досліджень [12, 14, 17, 28, 30] зрозуміло, що достатній рівень потенціалу енергоефективності комплексу «електропостачання – енергоспоживання» такого енергоємного та складного за технологією функціонування виробництва, як залізрудна шахта, не може бути реалізовано лише локальним рішенням – створенням енергосистем з персоніфікованим тим чи іншим підваріантом. Рішення повинно бути комплексним. При цьому, як варіант, структура такої АСК може будуватися на основі відповідних локальних підсистем з подальшим їх об'єднанням в єдиний управлінський комплекс [38, 53]. Тому в превентивному варіанті АСК повинна бути узагальненою, а процес електропостачання споживачів повинен керуватись узагальненим алгоритмом управління АСК на основі алгоритмів відповідних підсистем – складових загальної структури «АСК енергоспоживанням» залізрудної шахти [53, 114].

Згідно з загальноприйнятою у світі моделлю інтеграції стандарту рівнів керування (ІЕС-1131) тривіальна схема ієрархії встановлює загальну підпорядкованість підсистем низового рівня системам більш високого рівня та

визначає пріоритети в інформаційному обміні. А саме, кожен наступний рівень ієрархії підпорядкований. При цьому АСК більш високого рівня за рахунок більшого пріоритету можуть встановлювати завдання та контролювати роботу АСК більш низького рівня ієрархії.

Автоматизоване інтелектуальне керування електропостачанням в умовах типової шахти відноситься до третього рівня ієрархії згідно стандарту ІЕС-1131. Отже, відповідно до такої ієрархії її підсистеми повинні підпорядковувати локальні АСК більш низьких рівнів 1 і 2, а також формувати завдання (уставки керування) так критерії їх роботи. Зворотній зв'язок між загальною АСК та локальним АСК рівнів 1 і 2 здійснюється через контролюючі функції відповідних підсистем.

У свою чергу АСК підпорядковано системам більш високого рівня ієрархії, а саме рівням 4 і 5. Інформаційний обмін в прямому та зворотному напрямку між ними здійснюється аналогічним чином із вищезазначеним із урахуванням відповідної ієрархії.

На підставі означених вище вимог може бути рекомендована функціональна схема реалізації інтелектуального керування електропостачанням в умовах шахти наведена на рис. 3.1. Схема показує структурні та інформаційні зв'язки за всією ієрархією АСК.

Саме в такому контексті ієрархії розбудови «АСК електропостачання – електроспоживання» шахти логічно, що в такому варіанті структури АСК сегмент керування водовідливним комплексом, як обов'язкова складова системи, повинен бути в формі підсистеми.

З точки зору формалізації завдань керування таким об'єктом цей процес можна представити структурною схемою (рис. 3.2).

З огляду раціональності виробничої діяльності підземних гірничорудних підприємств необхідно мінімізувати витрачання ЕЕ з огляду забезпечення електроенергоефективності (в т.ч. за рахунок власної генерації $E^{(+)}$). З іншого боку

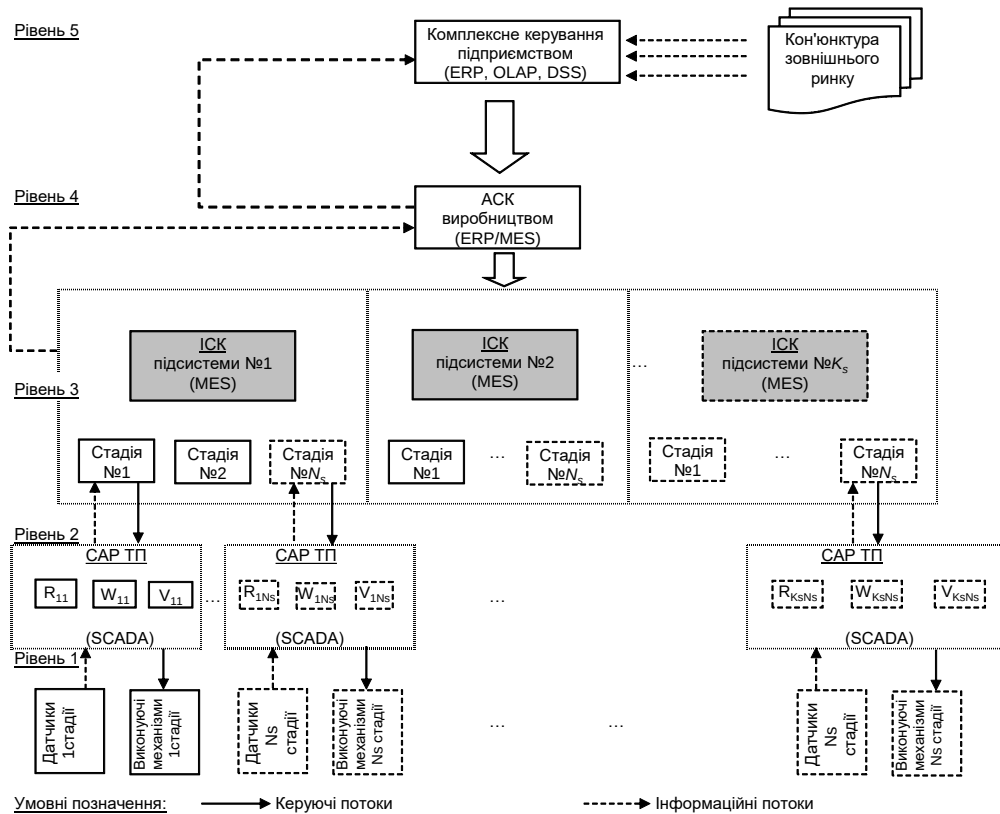


Рисунок 3.1 – Функціональна схема взаємодії підсистем «АСК електропостачання–електропосоживання» залізорудної шахти в загальній ієрархії згідно стандарту ІЕС-1131: K_s – кількість підсистем на шахті; N_s – кількість стадій збору інформації

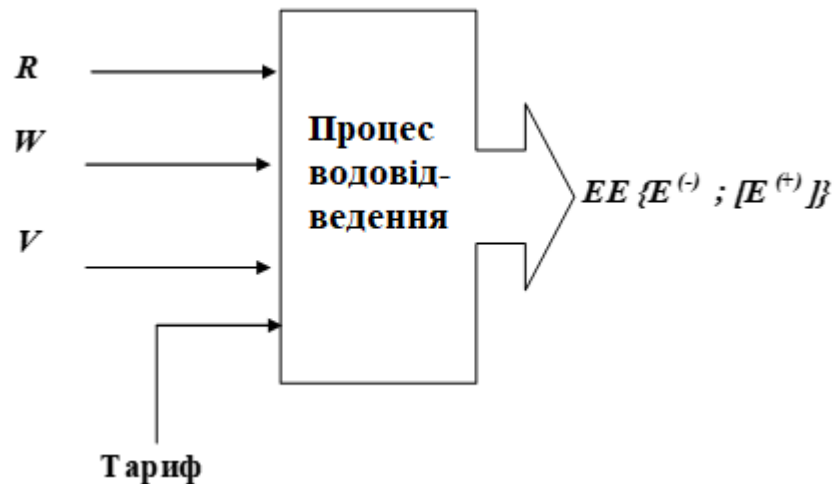


Рисунок 3.2 – Процес водовідведення як об'єкт керування: R – видобуток руди; W – витрати води при водовідведенні; V – витрати повітря в режимі вентиляції; $E^{(+)}$ – генерація ЕЕ, $E^{(-)}$ – витрати ЕЕ

як безальтернативний варіант треба забезпечити відкачування води в мінімально допустимому обсязі (причому, паралельно з забезпеченням вентиляції повітря підземних виробок, підйому видобутої ЗРС на поверхню тощо).

Враховуючи всі ці фактори у якості критеріїв ефективності роботи АСК водовідведенням має сенс обрати

$$\left\{ \begin{array}{l} E^{(-)} \Rightarrow Min \\ E^{(+)} \Rightarrow Max \\ \bar{W} = \sum_{i=1}^{24} W_i \geq W^* \end{array} \right\} \quad (3.1)$$

де $\bar{W}$ – середньодобове значення водовідведення; W_i – водовідведення за одну відповідну годину доби ($i=1\dots24$); W^* – певне оптимальне значення необхідного середньодобового рівня водовідведення.

Методика визначення останнього параметру досліджувалася автором в складі наукового колективу під керівництвом д-ра техн. наук, професора Сінчука О.М. протягом декількох останніх років в умовах дії різних добових тарифів на споживання ЕЕ [26, 27, 30], технологічних схем роботи, конкретних підземних залізрудних підприємств України.

Отже, ставиться подальше завдання з розробки варіанту структури інтелектуальної АСК та відповідного алгоритму її функціонування з кінцевим аналізом роботи системи шляхом комп'ютерного моделювання.

3.3 Узагальнений алгоритм багатofункціонального інтелектуального керування

Розглянемо можливості побудови узагальненого алгоритму «АСК електропостачання–електроенергоспоживання» для двох реально можливих випадків: 1 – вибірковий тариф з обмеженнями на добове енергоспоживання на підставі угод або 2 – змінний тариф (погодинно/24).

Для уточнення та розуміння тактики дослідження зазначимо, що розробка структури та параметрів алгоритму шахтної «АСК електропостачання – електроспоживання» включає в себе підструктуру (підсистему) керування процесом водовідведення.

Виходячи з вищезазначених завдань інтелектуального керування електроенергетичним комплексом в умовах підземних гірничодобувних підприємств було розроблено відповідний узагальнений алгоритм багатофункціонального керування електроенергоспоживанням (Додаток В) [28, 30].

3.3.1 Розробка алгоритму інтелектуального багатофункціонального керування електроенергоспоживанням. З урахуванням вищенаведених передумов в умовах нелінійних характеристик, часто неповної інформації, багатоканальні в реальних виробничих ситуаціях досить перспективним підходом є застосування сучасних інтелектуальних підходів для реалізації автоматизованого керування на основі нечіткої логіки – Fuzzy logic [135, 136].

На підставі даного підходу було розроблено і реалізовано програмно алгоритми роботи нечіткої системи керування (рис. 3.3), який реалізує кілька стратегій керування (тобто багатоканальність). А саме

$$S = \{R, R+W, R+V, W, 0, W+V, V, R+W+V\}. \quad (3.2)$$

Кожна стратегія визначає кількість можливих керуючих впливів (каналів керування), які потрібно надалі реалізувати в АСК. Наприклад, згідно з визначенням (3.2) кількість цих параметрів може бути 0 (немає керування або «ручний режим»), 1, 2 або 3. Однак, слід зазначити, що використовуючи таку методику кількість каналів в подальшому може бути збільшено при необхідності.

Слід також зазначити, що згідно з (В3.2) і (3.2) основним керованим фактором є потенційні витрати підприємства на електроенергію Z^e , які, в свою чергу, залежать від витрат електроенергії RE та тарифу HT .

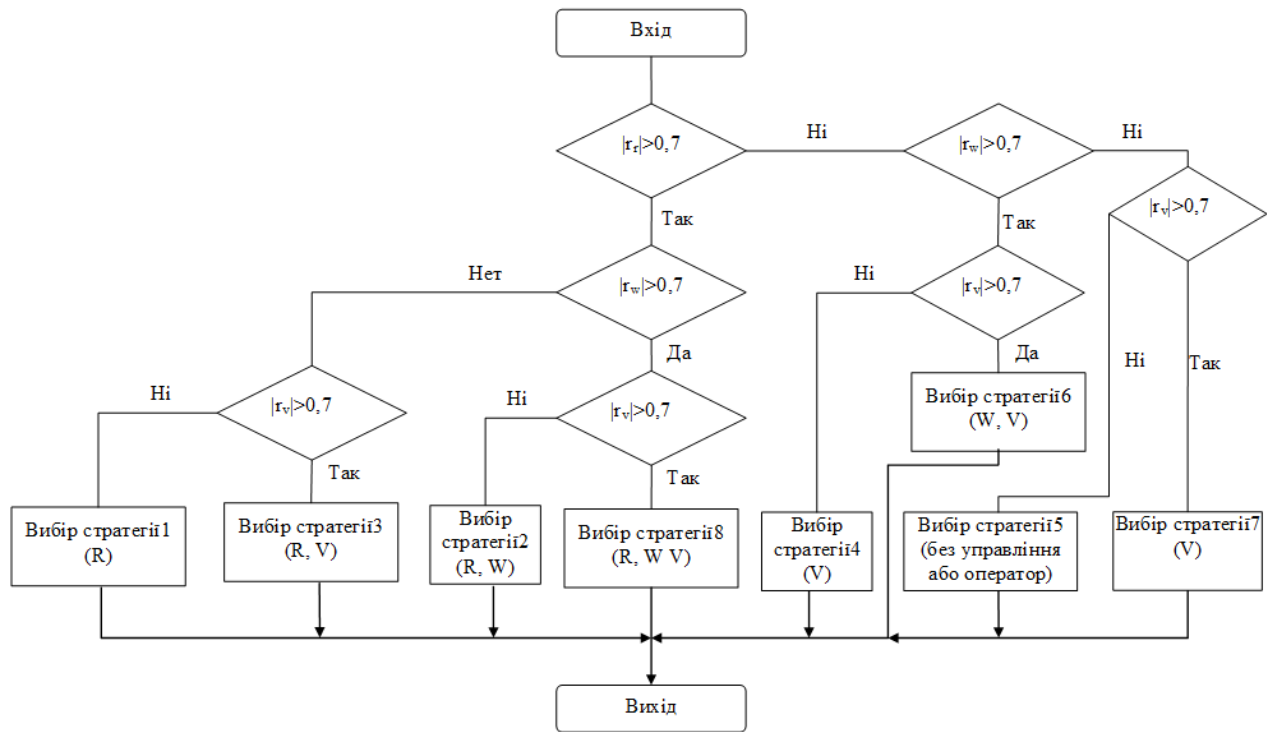


Рисунок 3.3 – Алгоритм процедур для вибору стратегії (параметричних каналів) багатофункціонального керування

Алгоритми включають в себе каскад умовних операторів з перевіркою значень коефіцієнтів кореляції між $[R, W, V]$ и $[RE]$ (попарно) з подальшим агрегуванням зв'язками типу «І/АБО». Перевищення порогу значення (тобто) $|r_{xy}| > 0.7$ буде означати необхідність розгляду даного каналу керування (або керуючого впливу) в результуючої стратегії. Таким чином, на виході визначається конкретна стратегія керування, яка відповідає кількості каналів керування: 1, 2 або 3. Наприклад, «по-ЗРС», «по-ЗРС і воді», «по-ЗРС, воді і вентиляції».

3.3.2. «Плаваючий» добовий тариф. Другий випадок, що був авансований на початку стосується «плаваючого» добового 24-х годинного тарифу, який змінюється кожної години, тобто $NS = 24$ відповідно до (В3.1), (В3.2). Також має присутність обмеження на споживання електричної енергії, а саме перевищення, як і зменшення споживання, від рівня, заявленого обсягу споживання ЕЕ є небажаним («штрафується»).

Проведений аналіз показав, що для цього випадку в якості базового показника цільової функції (3.1) доцільно брати значення питомого енергоспоживання з розрахунку на 1т води, котра відкачується в процесі водовідведення, тобто з урахуванням (В3.2)-(В3.5), (3.2)

$$I = \frac{RE}{W} + f^{ump}(RE, HT), \quad (3.3)$$

де $RE = \{E_1, E_2, \dots, E_{24}, E_\Sigma, E_\Sigma^{don}\}$ – відповідно множина показників енергоспоживання за першу годину доби, другу, ..., двадцять четверту;

$E_\Sigma = E_1 + E_2 + \dots + E_{24}$ – сумарне споживання ЕЕ на добу;

E_Σ^{don} – обмеження добового енергоспоживання (фактично замовлення);

$W = \{W_1, W_2, \dots, W_{24}, \bar{W}\}$ – множина показників водовідведення (погодинно за першу годину доби, другу, ..., двадцять четверту);

$\bar{W}$ – середньодобове водовідведення;

$HT = \{T_1, T_2, \dots, T_{24}, \bar{T}\}$ – тарифи на споживання ЕЕ по годинам доби (погодинно за за першу годину доби, другу, ..., двадцять четверту);

$\bar{T}$ – середньодобовий тариф.

Тоді для штрафної функції можемо застосувати вираз

$$f^{ump}(RE, HT) = r \frac{\bar{T}}{\bar{W}} \sqrt{\left[\frac{|E_\Sigma - E_\Sigma^{don}| + (E_\Sigma - E_\Sigma^{don})}{2} \right]^2}. \quad (3.4)$$

З урахування цього отримуємо остаточний вираз для функції мети

$$I = \left[\frac{1}{24} \sum_{i=1}^{24} \frac{E_i \cdot T_i}{W_i} + r \frac{\bar{T}}{\bar{W}} \sqrt{\left[\frac{|E_{\Sigma} - E_{\Sigma}^{don}| + (E_{\Sigma} - E_{\Sigma}^{don})}{2} \right]^2} \right] \rightarrow MIN. \quad (3.5)$$

Рішенням такої цільової функції будуть деякі вектори W^*, E^* показників водовідведення та відповідного енергоспоживання типу

$$\begin{aligned} W^* &= \{W_1, W_2, \dots, W_{24}\} \\ E^* &= \{E_1, E_2, \dots, E_{24}\}. \end{aligned} \quad (3.6)$$

Крім того слід врахувати, що, як було доведено в [25], між видобутком руди, водовідведенням та енергоспоживанням в умовах багатьох родовищ існує тісний кореляційний зв'язок. Отже тоді можливо розраховувати ці показники на підставі встановлених регресійних рівнянь типу

$$\begin{aligned} W_i &= f_{\beta_{pe}}(E_i) \\ E_i &= f_{\beta_{ep}}(W_i), \end{aligned} \quad (3.7)$$

де $f_{\beta_{pe}}(E_i)$, $f_{\beta_{ep}}(W_i)$ – відповідні регресійні моделі для водовідведення (на основі енергоспоживання) та/або відповідного енергоспоживання (на основі обсягу водовідведення).

Отже для вирішення завдання оптимізації на підставі функції мети типу (3.5) та знаходження відповідних векторів (3.6) треба застосувати певні оптимізаційні методи. Враховуючи доволі значну кількість невідомих точне вирішення такого завдання є доволі складним. Тому для наближеного вирішення застосуємо підхід стохастичної оптимізації [134]. З урахуванням цього відповідний алгоритм наближеного вирішення завдання оптимізації (3.5) містить такі етапи.

1. Початок роботи алгоритму.
2. Задати первинні дані:
 - максимальна кількість ітерацій для алгоритму оптимізації (N_{Σ});

– максимальне значення погодинного енергоспоживання ($E_i^{\max}$) для генератора випадкових значень;

– мінімальне значення погодинного енергоспоживання ($E_i^{\min}$) для генератора випадкових значень;

– допустиме (заявлене або оптимальне) значення добового енергоспоживання (E_{Σ}^{don});

– варіативний коефіцієнт для функції штрафу (r).

3. Ініціалізація первинних значень для робочих даних алгоритму:

– субоптимальне значення функції мети ($I = +\infty$);

– субоптимальне значення для питомого погодинного енергоспоживання ($\frac{E_i^*}{W_i^*} = 0$);

– номер поточної ітерації алгоритму ($j=1$).

4. Генеруємо 24 випадкових значення погодинного енергоспоживання ($E_i, [i=1 \div 24]$) з рівномірним законом розподілу $\xi_i = RND(0 \div 1)$ на інтервалі $[0 \div 1]$, а потім «розтягуємо» на необхідний інтервал $[E_i^{\min} \div E_i^{\max}]$:

$$E_i = E_i^{\min} + (E_i^{\max} - E_i^{\min}) \xi_i, \text{ тобто}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} E_1 = E_1^{\min} + (E_1^{\max} - E_1^{\min}) \xi_1 \\ E_2 = E_2^{\min} + (E_2^{\max} - E_2^{\min}) \xi_2 \\ \dots \\ E_{24} = E_{24}^{\min} + (E_{24}^{\max} - E_{24}^{\min}) \xi_{24} \end{array} \right\}$$

5. Розраховуємо відповідні 24 значення для водовідведення ($W_i, [i=1 \div 24]$) на основі відповідних регресійних моделей [25]

$$\left\{ \begin{array}{l} W_1 = f_{\beta pe}(E_1) \\ W_2 = f_{\beta pe}(E_2) \\ \dots \\ W_{24} = f_{\beta pe}(E_{24}) \end{array} \right\}$$

6. Визначаються необхідні усереднені ($\bar{T}, \bar{W}$) та сумарні (E_Σ) значення для подальшого розрахунку поточного значення цільової функції (3.5)

$$\bar{T} = \frac{1}{24} \sum_{i=1}^{24} T_i,$$

$$\bar{W} = \frac{1}{24} \sum_{i=1}^{24} W_i,$$

$$E_\Sigma = \sum_{i=1}^{24} E_i.$$

7. Розраховується нове поточне значення функції мети (I) на підставі виразу (3.5).

8. Якщо $I < I^*$, то пере визначаємо субоптимальне значення цільової функції $I^* = I$ та відповідних векторів енергоспоживання та водовідведення:

$$E_i^* = E_i, W_i^* = W_i, i = 1 \div 24.$$

9. Додаємо номер для наступної ітерації $j = j + 1$, якщо $j \leq N_\Sigma$, то переходимо до наступного циклу (ітерації) починаючи зі блоку № 4. Інакше, це означає, що досягнуто останньої ітерації оптимізації, переходимо до завершального блоку алгоритму.

10. Роздруковуємо (або вносимо до бази даних) субоптимальні значення функції мети, векторів енергоспоживання та водовідведення: $I^*, E_i^*, W_i^*, i = 1 \div 24$.

11. Завершення роботи алгоритму оптимізації.

На рисунках (рис. 3.4–3.6) наведено результати оптимізації із застосуванням наведеного алгоритму (рис. 3.3). Ці показники віддзеркалюють

динаміку зміни значень цільової функції (I, I^*), питомих енерговитрат (E_i^*/W_i^*) та штрафної функції ($f^{штр}(\cdot)$) залежно від номеру ітерації (кроку розрахунку j).

3.3.3. Априорне оцінювання ефективності запропонованих алгоритмів керування.

1. Аналіз результатів стохастичної оптимізації (рис. 3.7, 3.8) показує, що навіть за умов застосування доволі незначної кількості ітерацій $N_z=10$ можливо покращити первинне рішення на понад 60% (первинне значення цільової функції $I^*=27,7$ та остаточне значення на останній ітерації $I^*=10,7$).

2. На підставі проведеного моделювання вдалося визначити необхідні вектори для добового погодинного водовідведення (W^*) та відповідного енергоспоживання (E^*), що відповідає субоптимальному значенню цільової функції (I^*). Отримані результати можна застосовувати для рекомендацій з більш раціонального планування роботи підприємства. Для отримання ліпшого рішення треба додатково збільшити кількість ітерацій на 2-3 порядки.

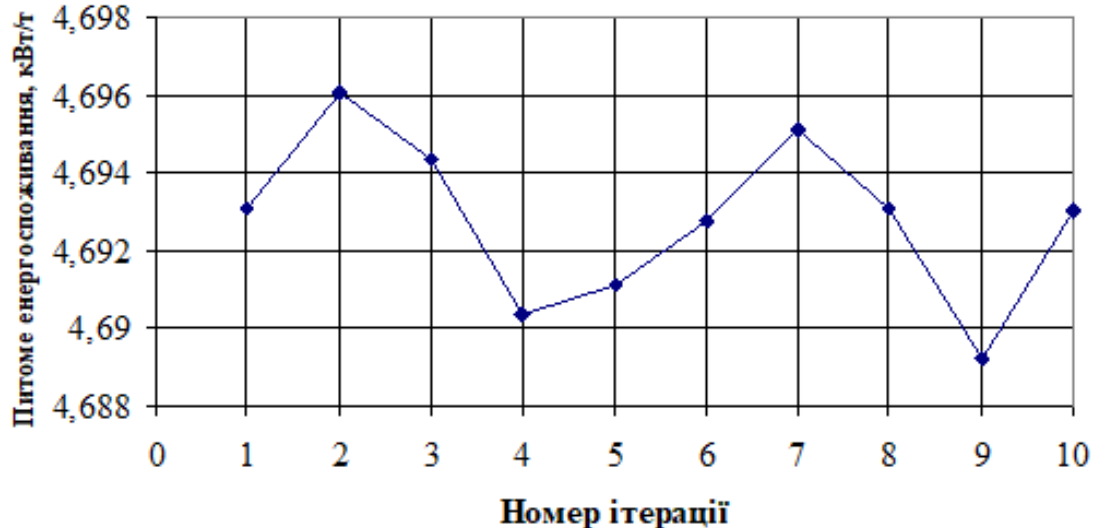


Рисунок 3.4 – Зміна усередненого значення погодинного питомого рівня електроенергоспоживання головними водовідливними комплексами в процесі оптимізації



Рисунок 3.5 – Зміна значень функції штрафу за надмірне або недостатнє згідно заявлених обсягів споживання електроенергії

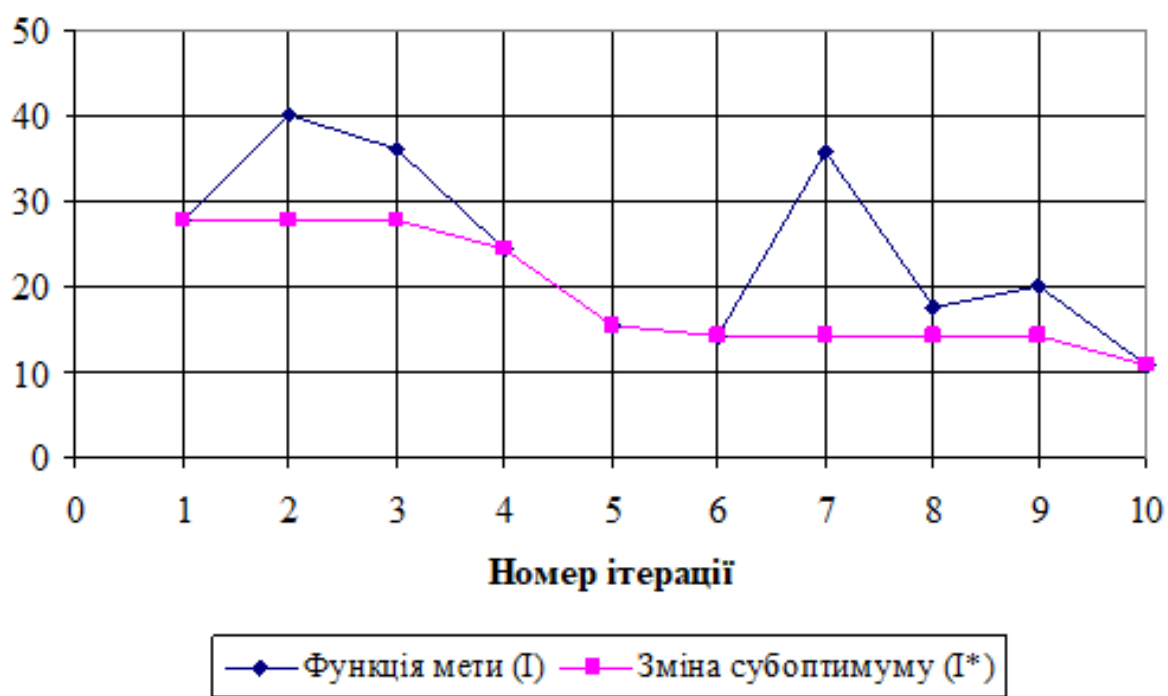


Рисунок 3.6 – Зміна значень цільової функції (I) та відповідного субоптимуму (I^*)

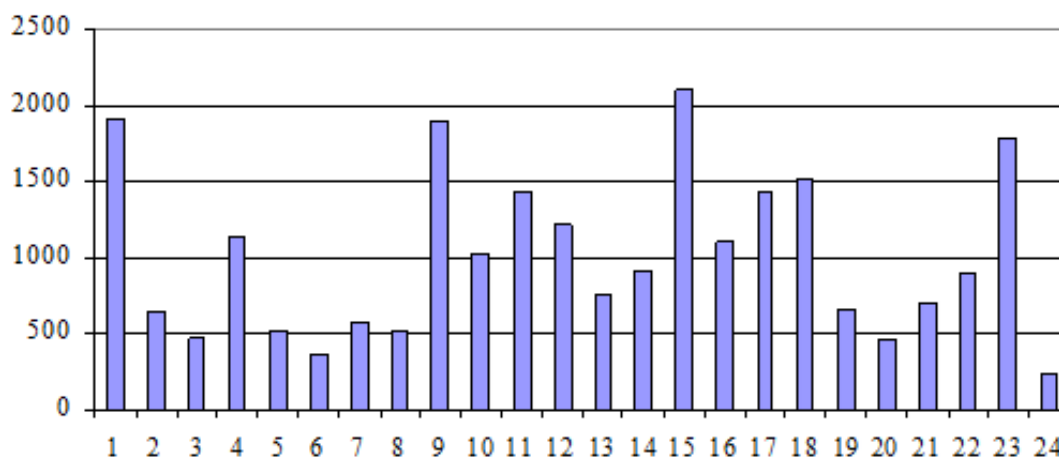


Рисунок 3.7 – Значення вектору погодинного (на добу) електроенергоспоживання (E^*), що відповідає субоптимуму функції мети (I^*) на прикладі статистики шахти «Покровська» (м. Кривий Ріг)

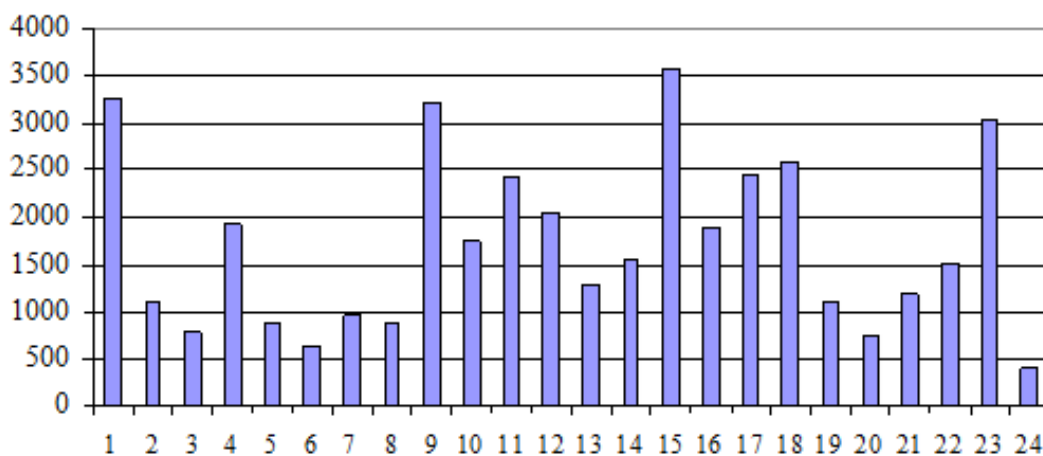


Рисунок 3.8 – Значення вектору погодинного (на добу) водовідведення (W^*), що відповідає субоптимуму функції мети (I^*) на прикладі статистики шахти «Покровська» (м. Кривий Ріг)

3.4 Розробка структури інтелектуальної АСК на основі нечіткої логіки (Fuzzy Logic)

Як доведено раніше у попередньому підрозділі, а також у працях [25-28, 132-134] для побудови інтелектуальної АСК доцільно застосувати методологію Fuzzy Logic, що містить обов'язкові етапи: фазифікації, нечіткого логічного висновку та дефазифікації.

3.4.1. Принципи фазифікації та формування бази логічних правил виведення в умовах одноканального керування (для двотарифного випадку типу «Економ/Пік»).

Визначаємо безліч лінгвістичних змінних (термів) для всіх вищенаведених нечітких параметрів:

$$T_1^{EE} = \left\{ \frac{MIN}{NB}, \frac{середнє}{Z}, \frac{MAX}{PB} \right\}, \quad (3.8)$$

$$T_2^{Тариф} = \left\{ \frac{Ніч}{NS}, \frac{Пік}{PS} \right\}, \quad (3.9)$$

$$T_3^{Руда} = \left\{ \frac{MIN}{NB}, \frac{середнє}{Z}, \frac{MAX}{PB} \right\}, \quad (3.10)$$

де T_1^{EE} , $T_2^{Тариф}$, $T_3^{Руда}$ – ідентифікатори множинних термів для нечітких змінних: витрати електроенергії, тарифоутворення та рудопотоку; $\{MIN, середнє, MAX\} + \{Ніч, Пік\}$, $\{NB, Z, PB\} + \{NS, PS\}$ – повні або скорочені ідентифікатори для позначення відповідних значень даних термів.

Як видно з множин (3.8), (3.9), для подальшої роботи, параметрами енергоспоживання та рудопотоку приймається тризначна шкала, а для змінної тарифу – двозначна. Однак, за потреби, кількісні значення всіх цих шкал можуть бути змінені в будь-якому напрямку.

В подальшому для здійснення фазифікації нечітких змінних множини (3.8) і (3.10) були обрані стандартні трикутні функції приналежності, а для множини (3.9) тангенціальна. Приклад параметризації даних змінних та функцій здійснювався за допомогою середовища прикладного пакета MATLAB. На

рис. 3.9 показаний приклад такої параметризації на основі даних статистики шахти «Криворізька» (м. Кривий Ріг).

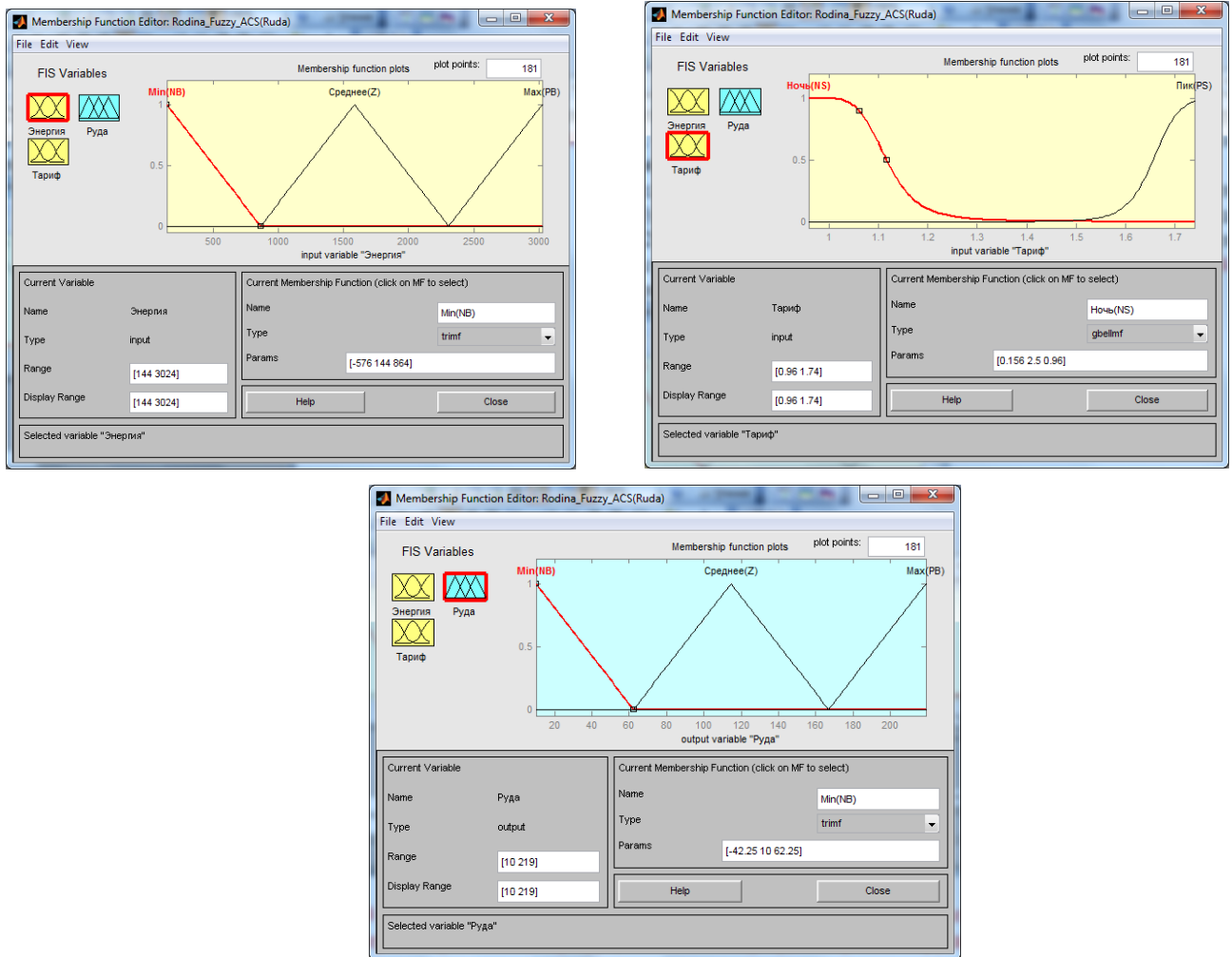


Рисунок 3.9 – Приклад фазифікації на основі даних статистики по ш. «Криворізька» (м. Кривий Ріг) за параметрами електроенергоспоживання (умовно 2-х зонний тариф)

Попередньо визначених нами нечітких множин та відповідних термів (3.8) – (3.10) правила нечіткого висновку формуватимемо у вигляді:

1) IF (Якщо) «Споживання ЕЕ» (β_1) = «MIN» (NB) AND (И) «Тариф» (β_2) = «Пік» (PS) THEN (то) «Рудопотік» = «MIN» (NB);

2) IF (Якщо) «Споживання ЕЕ» (β_1) = «MAX» (PB) AND (И) «Тариф» (β_2) = «Ніч» (NS) THEN (то) «Рудопотік» = «MAX» (PB);

...

Повну базу таких правил наведено на рис. 3.10 реалізовано у вигляді програмного коду Matlab.

Як базовий алгоритм для подальшої процедури дефазифікації приймаємо стандартну методику Мамдані.

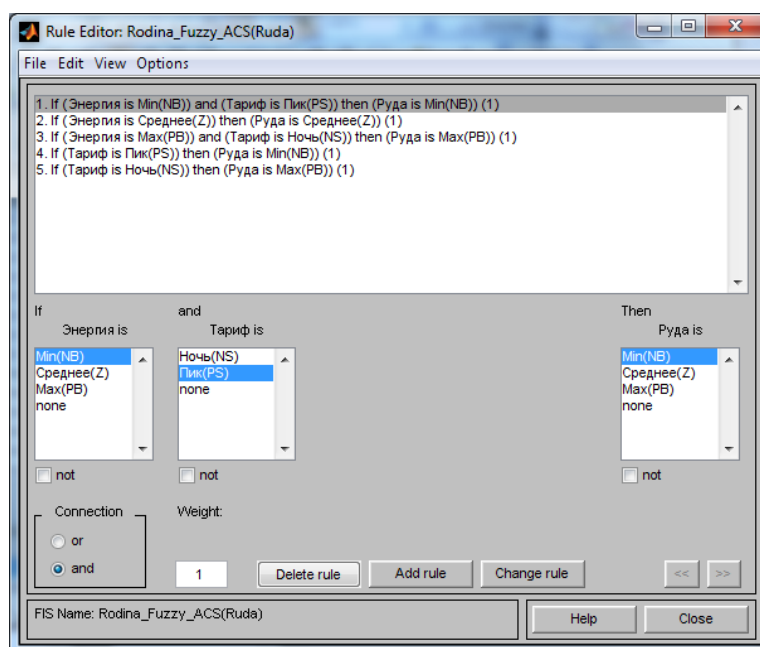


Рисунок 3.10 – Формування бази правил прийняття рішень

3.4.2. Принципи фазифікації та формування бази логічних правил виведення в умовах двоканального керування. Даний тип керування реалізується двома з можливих керуючих впливів («ЗРС/вода»). Відповідно до алгоритму (рис. 3.3) це можуть бути стратегії №№2, 3, або 6. Загальні принципи фазифікації та формування бази логічних правил виведення для двопараметричного варіату керування на прикладі стратегії №2 («ЗРС+Водовідведення»). Інші такі стратегії реалізовуватимуться аналогічно. Керуючими впливами тут є: рудопотік (R) та обсяг прокачування води (W), керованим параметром буде значення витрати електроенергії з (3.1). Параметри подачі повітря при вентиляції відносимо до тих, що збурюють.

Розширимо базові нечіткі множини (3.8)-(3.10) для можливості реалізації двоканального керування. Тоді до множин вже визначених вище виразів потрібно додатково визначити термім:

$$T_4^{Boda} = \left\{ \frac{MIN}{NB}; \frac{середнє}{Z}; \frac{MAX}{PB} \right\}, \quad (3.11)$$

де T_4^{Boda} – ідентифікатор терму для нечіткої змінної обсяг прокачування води.

З урахуванням (3.8)-(3.11) наведемо кілька прикладів формування правил нечіткого висновку для такого виду керування:

1) IF (Якщо) «Споживання ЕЕ» (β_1) = «MIN» (NB) AND (И) «Тариф» (β_2) = «Пік» (PS) THEN (то) «Рудопотік» = «MIN» (NB), «Водовідведення» = «MIN» (NB);

2) IF (Если) «Споживання ЕЕ» (β_1) = «MAX» (PB) AND (И) «Тариф» (β_2) = «Ніч» (NS) THEN (то) «Рудопотік» = «MAX» (PB), «Водовідведення» = «MAX» (PB);

...

Інші етапи здійснюються аналогічно до попереднього випадку, описаного в пп. 3.4.1.

3.4.3. Принципи фазифікації та формування бази логічних правил виведення в умовах триканального керування. Цей тип керування реалізується трьома керуючими впливами («ЗРС+Вода+Повітря»). Відповідно до алгоритму (рис. 3.3) це стратегія №8. Керуючими впливами тут є: рудопотік (R) та обсяг прокачування води (W) та вентиляції повітря (V), керованим параметром буде значення витрати електроенергії з (3.1). Параметр подачі повітря залишається збурюючим. Загальні принципи фазифікації та формування бази логічних правил виведення для триканального керування.

Тоді до множин вже визначених вище термів (3.8)-(3.11) потрібно додатково визначити терм

$$T_5^{Повітря} = \left\{ \frac{MIN}{NB}; \frac{середнє}{Z}; \frac{MAX}{PB} \right\}, \quad (3.12)$$

де $T_5^{Повітря}$ – ідентифікатор терму для нечіткої змінної об'єм повітря при вентиляції підземних виробок шахти.

З урахуванням (3.8)-(3.11) наведемо кілька прикладів формування правил нечіткого висновку для такого виду керування:

1) IF (Якщо) «Споживання ЕЕ» (β_1) = «MIN» (NB) AND (И) «Тариф» (β_2) = «Пік» (PS) THEN (то) «Рудопотік» = «MIN» (NB), «Вододідведення» = «MIN» (NB), «Вентиляція» = «MIN» (NB);

3) IF (Якщо) «Споживання ЕЕ» (β_1) = «MAX» (PB) AND (И) «Тариф» (β_2) = «Ніч» (NS) THEN (то) «Рудопотік» = «MAX» (PB), «Водовідведення» = «MAX» (PB), «Вентиляція» = «MAX» (PB);

...

Інші етапи здійснюються аналогічно першому випадку, описаному у пп. 3.4.1.

3.4.4. Принципи побудови нечітких регуляторів інтелектуальних АСК. З урахуванням певних вище нечітких змінних, нечітких множин (3.8)-(3.12) та функцій приналежності (рис. 3.9) у редакторі FIS задаються вхідні та вихідні параметри. Як показано вище, тут мається на увазі, що для подальшої дефазифікації використовуватиметься алгоритм Мамдані [136].

На рис. 3.11 наведений приклад багатоканального («ЗРС/Вода/Повітря») нечіткого регулятора регулятора для інтелектуальної «АСК енергопостачання–електроспоживання». У якості базового обраний умовний 2-зонний тариф типу «Економ/Пік». Виходячі з цього будь який одно- або двохканальний регулятор буде відповідним приватним випадком від цього (наприклад, як було продемонстровано в [25, 26]).

У залежності від вхідних значень R , W , V (як потенційних керуючих впливів в інтелектуальній АСК) та обраного тарифу шляхом нечіткого логічного висновку визначається фактичний рівень енергоспоживання $EE \{E^{(-)}\}$. Причому, у разі наявності додаткової власної (автономної) електроенергетичної генерації $\{E^{(+)}\}$, це буде також враховано у підсумковому енергетичному балансі підприємства протягом доби.

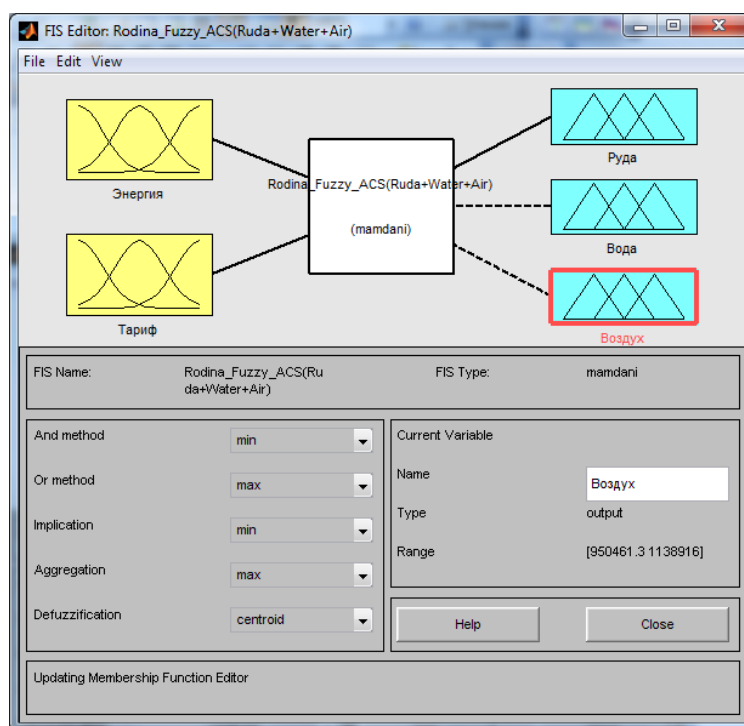


Рисунок 3.11 – Створення та визначення параметрів нечіткого багатопараметричного регулятора

У роботі була здійснена алгоритмічно-програмна реалізація різноманітних інтелектуальних нечітких регуляторів, а, в подальшому, їх апробація шляхом комп'ютерного моделювання на реальних даних підприємств з підземним видобутком руди у Кривбасі (ш. Криворізька, ш. Покровська, ш. Козацька тощо). Окремі результати таких випробувань наведені у роботах автора [25-28, 48].

3.5 Моделювання роботи АСК в режимі водовідведення

Базові принципи здійснення моделювання подібних систем та доведення їх адекватності докладно розглянуті в роботах [50, 51, 135-140].

Для моделювання роботи «АСК електропостачання–електроспоживання» використаємо середовище модуль Fuzzy Logic Toolbox (FLT) із відомого програмного математичного пакету прикладних програм MATLAB. Для цього скористаємося стандартною методикою нечіткого моделювання, описаною в [136, 137].

Побудову нечіткого регулятора здійснимо на прикладі однопараметричного керування каналом «Водовідведення-Енергоспоживання» на основі статистики даних, отриманих по шахті «Криворізька» (м. Кривий Ріг). З урахуванням певних вище нечітких змінних, нечітких множин (3.13)-(3.17) та функцій приладдя в редакторі FIS задаються вхідні та вихідні параметри. Як показано вище, тут мається на увазі, що для подальшої дефазифікації використовуватиметься алгоритм Мамдані (рис. 3.11).

Наступним етапом є визначення бази правил для нечіткого висновку. Приклади цих правил наведено вище (пп. 3.4), а повний перелік цих правил показано на рис. 3.10.

Згідно зі статистикою даних по цій шахті [25, 26] у процесі фазифікації визначено відповідні максимальні та мінімальні добові параметри:

- витрата електроенергії (144; 3024) кВт/добу;
- водовідведення (10; 219) т(або м³)/добу.

На основі таких даних було отримано 3d-модель поверхні для нечіткого виведення для розробленої нечіткої моделі (рис. 3.12).

З використанням відповідного режиму MATLAB FLT для моделювання процедур нечіткого виведення здійснимо перевірку роботи алгоритмів (рис. 3.1, 3.2), а потім здійснюємо розрахунок очікуваної реакції нечіткого регулятора на керуючі впливи (рис. 3.13). При цьому використовуються різні значення двозонного тарифу на електроенергію, що споживається. Як базові тарифи були взяті поточні дані по компанії «ДТЕК Дніпрообленерго» (для промислових споживачів першої категорії) [140].

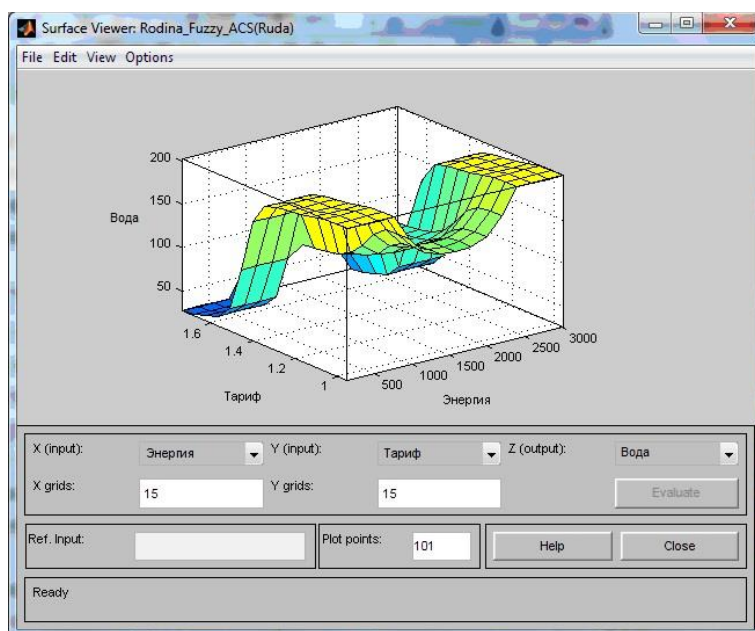
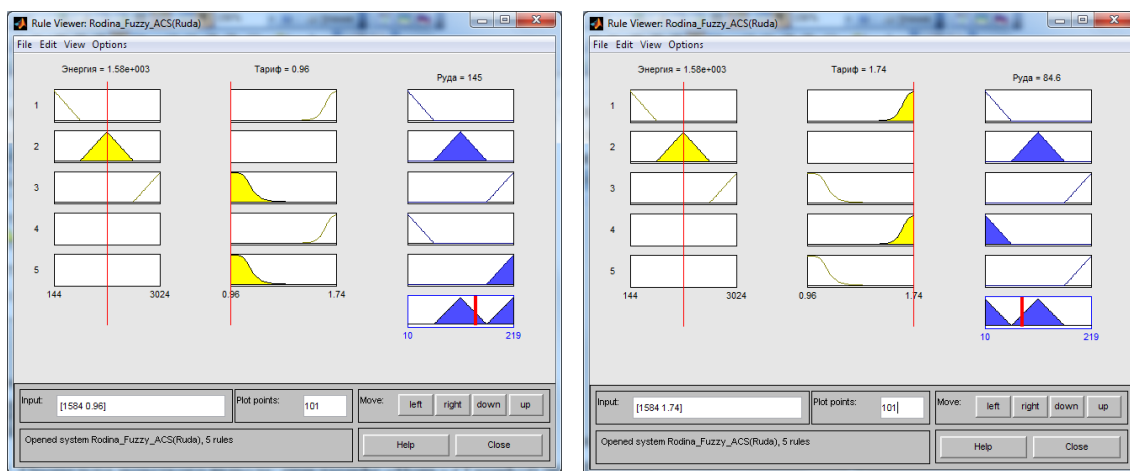


Рисунок 3.12 – 3d-модель поверхні для нечіткого виведення для нечіткої моделі (за даними ш. «Криворізька» (м. Кривий Ріг) в варіанті умовного 2-х зонного тарифу)



(1)

(2)

Рисунок 3.13 – Процедура нечіткого регулятора на керуючі впливи: при тарифі «Економ»; при тарифі «Пік» (Тариф=1,74)

Таким чином, на основі багаторазового використання даного модуля здійснюється розрахунок всіх необхідних даних для подальшої візуалізації та

аналізу відповідних залежностей (за водопотоками, електроенергією, що споживається, тарифами, витратами тощо).

3.5.1. Моделювання одноканального керування. На рис. 3.14 показані результати моделювання роботи нечіткої однопараметричної «АСК електропостачання–електроспоживання» на основі одного керуючого впливу – добового водовідведення, розподіленого погодинно. Дискретність моделювання регулятора становила 0,5 години = 30 хв. У ході моделювання використовувалися вихідні дані з діючих залізничних шахт. Інші підходи до інтелектуального керування в умовах подібних підприємств (в т.ч. з альтернативними тарифами та/або параметрами керування) продемонстровано в дослідженнях [25-28, 48].

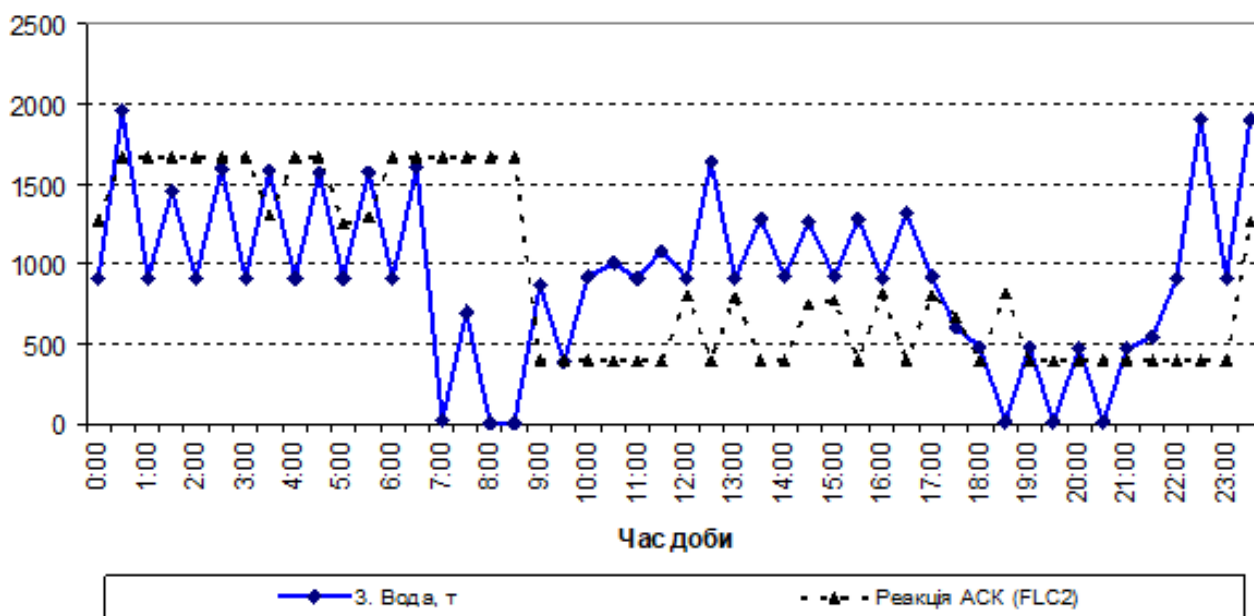


Рисунок 3.14 – Залежності з водовідведення на шахті «Криворізька» (м. Кривий Ріг) як єдиного параметру керування та прогнозу відкачування води за умови максимізації останньої за критерієм типу (3.1)

Аналіз результатів моделювання рис. 3.14 та проведених аналітичних розрахунків показує, що використання умовно двозонного тарифу веде до збільшення витрат на спожиту електроенергію на 12,88 % (без АСК).

Застосування АСК з Fuzzy-регулятором (FLC) на основі мінімакських критеріїв типу (3.1), (В3.1) в умовах шахти «Криворізька» дозволяє збільшити обсяги добового відкачування води на 11,9 %. При цьому добове споживання ЕЕ зросте відповідно на 11,9 %, а витрати на використання електроенергії з урахуванням умовного двозонного тарифу зменшуватимуться на 4,31 % (за рахунок раціональнішого перерозподілу за погодинними зонами доби).

3.5.2. Моделювання багатопараметричного варіанту керування. Основні принципи побудови нечітких регуляторів (у т.ч. фазифікації, нечіткого логічного висновку, дефазифікації тощо), а також алгоритми їхньої роботи в умовах багатопараметричного керування були описані попередніх розділах. У цьому підрозділі наведемо результати моделювання автоматизованого керування енергоспоживання з прикладу трьох каналів («ЗРС...», «Вода...», «Повітря...»). Основні розрахунки було проведено на прикладі статистики роботи шахти «Криворізька» (м. Кривий Ріг). Однак, як свідчить зроблений аналіз, використовуючи цю методологію, ці результати можуть бути аналогічно відтворені для всіх стратегій алгоритмів (рис. 3.1, 3.2) та в умовах інших підприємств (шахт).

Таким чином, реалізація багатопараметричного керування в середовищі MATLAB з використанням структури нечіткого інтелектуального регулятора типу (рис. 3.11) на підставі вихідних реальних виробничих даних показує результати аналогічні попередньому випадку (рис. 3.14). Зокрема, по каналах «ЗРС/Вода» модельна реалізація мінімаксного регулювання на основі критерію (3.3) показано в [27].

Результати аналізу інших розрахункових значень показують, що за умов двоставкового тарифу добові витрати зростають на 7,1 % проти альтернативами [25]. Використання мінімаксного регулювання (мінімізація енергоспоживання з максимізацією добового водовідведення) каналом «Вода» призведе до зростання добового споживання приблизно на 6,97 %. Однак, як було показано [26],

повністю компенсується збільшенням добового видобутку сировини (приблизно +508 т/добу) [27].

На рис. 3.11 показано структурну схему двопараметричного Fuzzy-регулятора («ЗРС-Вода-Повітря»), яка реалізується на основі застосування основних принципів, алгоритмів та правил, які були викладені вище у пп. 3.3. Повна формалізація подібних регуляторів наведена в [28].

З урахуванням того, що реалізація регулювання за двома першими параметрами (каналами) керування («ЗРС-Вода») повністю аналогічна вже викладеним і продемонстрованим раніше, далі обмежимося приведенням результатів комп'ютерного моделювання по третьому каналу «Повітря» (рис. 3.15) за всіма трьома технологічними переділами (тобто видобуток, водовідлив, вентиляція).

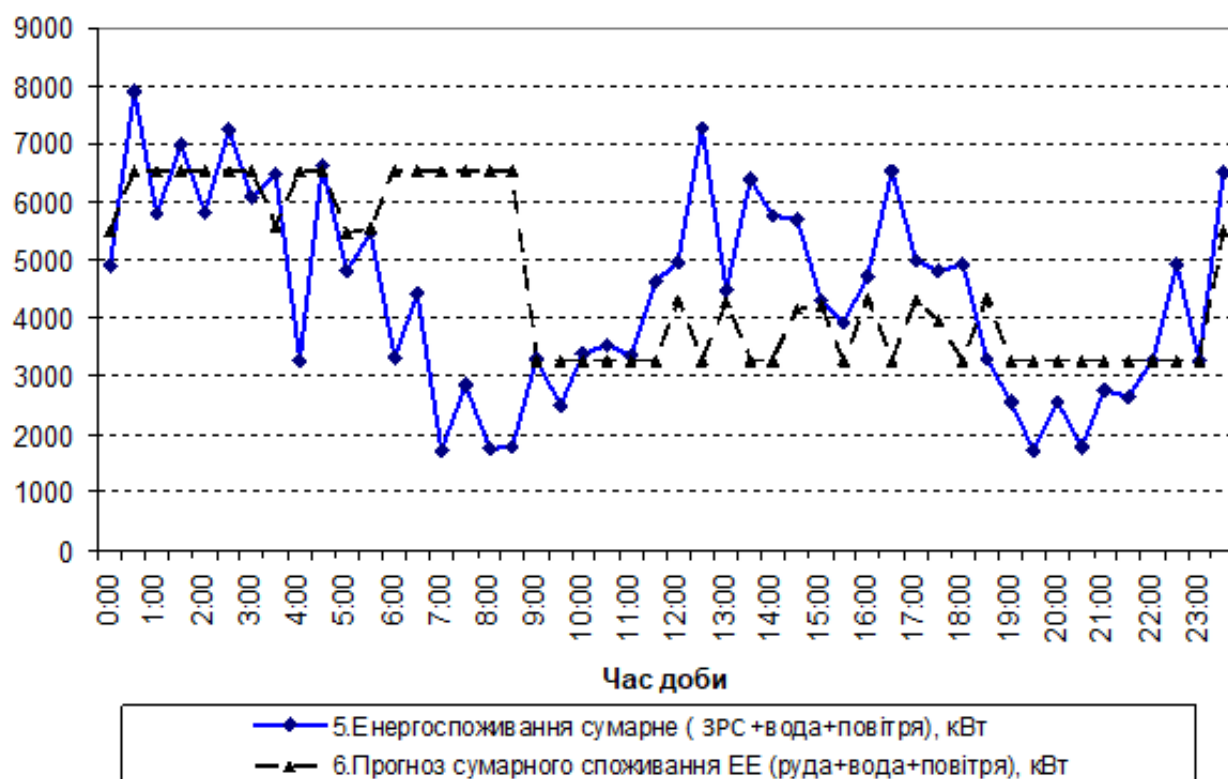


Рисунок 3.15 – Результати триканального керування («Руда-Вода-Повітря») сумарним споживанням ЕЕ в умовах шахти «Криворізька» (м. Кривий Ріг) в умовах двоставкового тарифу

Результати аналізу отриманих залежностей показують, що, на відміну від одно- та двопараметричного регулювання при застосуванні умовно двозонного тарифу за споживану ЕЕ використання мінімаксного регулювання призведе до прогнозованого зростання добового споживання ЕЕ приблизно на 4,45 %. Однак, як було показано у розрахунках [25-28], це повністю компенсується збільшенням загальної ефективності. Одночасно добові витрати на спожиту ЕЕ будуть знижені на 2,5 % через раціональніший розподіл ЗРС-/водо-/повітря-потоків за основними технологічними переділами. Отже, застосування трьохпараметричного нечіткого керування з можливістю узгодженого керування (рудопотоками, водовідливом та вентиляцією) є найбільш ефективним в умовах підземного видобутку залізорудної сировини.

3.6 Моделювання роботи АСК в режимі генерації електричної енергії

Як свідчать дослідження [20, 24-28, 48, 114] в тому числі автора [29, 53, 75, 121], одним із ефективних засобів підвищення електроенергоефективності видобутку ЗРС є застосування автономних генеруючих електропотужностей котрі будуть функціонувати на власних ПЕР. Про цей варіант досягнення електроенергоефективності буде викладено в розділі 4 даного дослідження. В цьому ж підрозділі зупинимось на рамочному варіанті реалізації цієї ідеї в структурі «АСК електропостачання–електроспоживання» шахти.

У режимі додаткової генерації ЕЕ з'являється можливість часткової компенсації сумарного енергоспоживання за рахунок додаткової енергії в тому числі з гідроакумуючих джерел. На рис. 3.16, 3.17 наведено приклади

моделювання роботи таких підприємств (на прикладі шахт «Криворізька» та «Покровська» (м. Кривий Ріг) відповідно) в 4-х режимах.

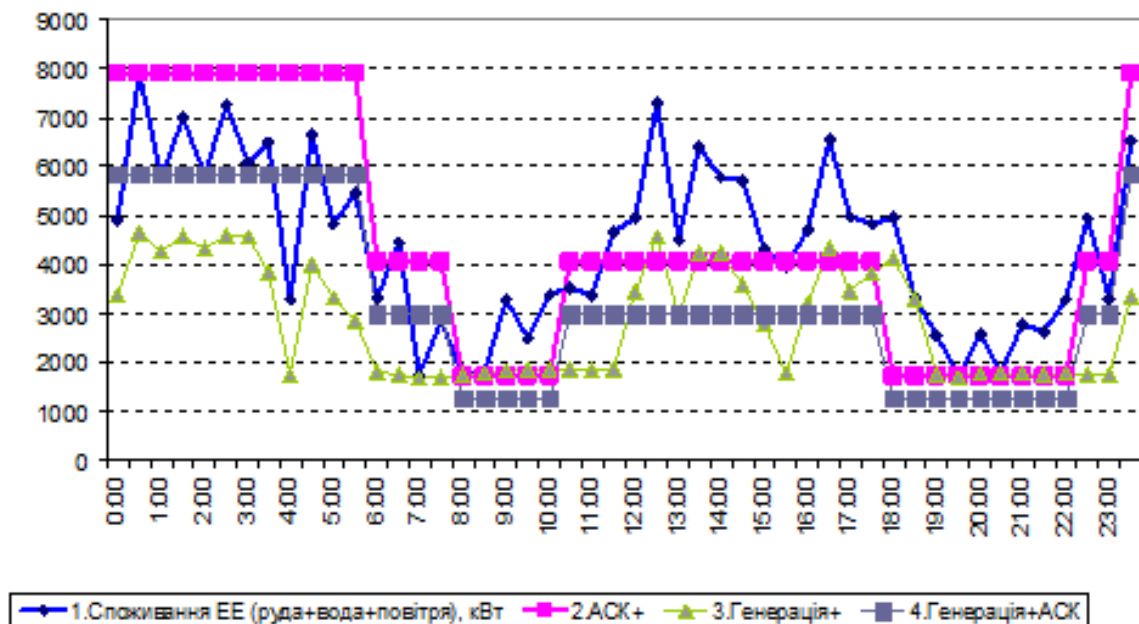


Рисунок 3.16 –Результати моделювання роботи шахти «Криворізька» (м. Кривий Ріг) в таких режимах:

- 1) звичайний режим (без застосування інтелектуального керування та додаткової генерації);
- 2) із застосуванням інтелектуального керування але без додаткової генерації;
- 3) із застосуванням додаткової генерації але без застосування інтелектуального керування;
- 4) із застосуванням інтелектуального керування та додаткової генерації ЕЕ.

Аналіз результатів моделювання свідчить про можливість скорочення споживання ЕЕ при роботі у більш прогресивних режимах 3-4 на 26-35 % (в умовах шахти «Криворізька» (м. Кривий Ріг)) (рис. 3.16). Аналогічні результати показує і подібне моделювання для умов шахти «Покровська» (м. Кривий Ріг) (рис. 3.17).

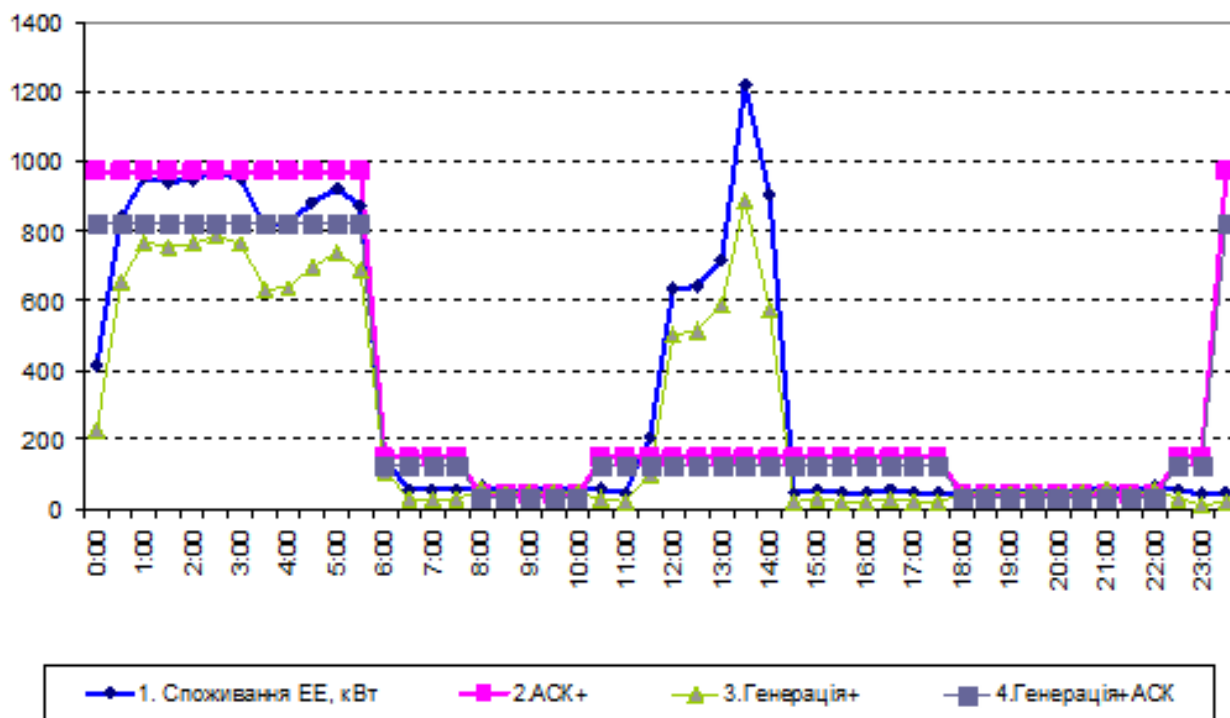


Рисунок 3.17 – Результати моделювання роботи шахти «Покровська»

(м. Кривий Ріг) в таких режимах:

- 1) звичайний режим (без застосування інтелектуального керування та додаткової генерації);
- 2) із застосуванням інтелектуального керування але без додаткової генерації;
- 3) із застосуванням додаткової генерації але без застосування інтелектуального керування;
- 4) із застосуванням інтелектуального керування та додаткової генерації.

Аналіз результатів моделювання свідчить про можливість скорочення споживання ЕЕ при роботі режимах 3-4 на 15-24 % (в умовах шахти «Криворізька» (м. Кривий Ріг).

3.7 Висновки до розділу 3

1. Шляхом ретроспективного аналізу відомих джерел інформації та послідууючої систематизації результатів доведено актуальність реалізації інтелектуального керування локальним процесом водовідведення в складі комплексної автоматизованої системи керування електроенергетичною системою в умовах залізрудних шахт. У подальшому здійснено постановку завдання розробки структури, алгоритмів роботи такої системи, а також доведення ефективності її функціонування шляхом комп'ютерного моделювання.

2. Аналіз результатів стохастичної оптимізації (рис. 3.6 – 3.8) показує, що навіть за умов застосування незначної кількості ітерацій $N_{\Sigma}=10$ можливо покращити первинне рішення на понад 60 % (первинне значення цільової функції $I^*=27,7$ та остаточне значення на останній ітерації $I^*=10,7$).

3. Використання двоставкового («Економ/Пік») тарифу без застосування інтелектуальних нечітких АСК веде до збільшення добових витрат на спожиту ЕЕ на 12,88 % при одноканальному регулюванні водовідведення і відповідно на 7,1 % при двоканальному керуванні рудотоком та водовідливом одночасно. Однак, застосування нечітких регуляторів дозволяє компенсувати ці втрати.

4. Застосування АСК нечітким 3-х параметровим регулюванням рудопотоку, водовідливу та вентиляції дозволяє в умовах двоставкового тарифу дозволяє (за рахунок більш раціонального перерозподілу за добовими інтервалами) скоротити витрати на спожиту ЕЕ (наприклад, за даними шахти «Криворізька», зі збільшенням добового споживання ЕЕ на 4,45 % (загальні витрати скорочуються 2,5 %).

РОЗДІЛ 4

ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ПІКОВИХ ГІДРОАКУМУЛЮЮЧИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ У СТРУКТУРАХ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЗАЛІЗОРУДНИХ ШАХТ

4.1 Узагальнення до досліджень ефективності застосування ГАЕС як пікових варіантів генерації електропостачання залізорудних шахт

Одним із сучасних спрямувань з підвищення ефективності СЕП в тому числі промислових підприємств є застосування синергетичних варіантів структур їх електроенергетичних систем. В таких СЕП трансформуються в введені мереж з розподільчою генерацією ЕЕ. Такі структури передбачають застосування в СЕП поряд з централізованою генерацією ЕЕ від електростанцій автономні джерела електричної енергії.

В роботі [122] наведено науково обґрунтовані кейси з оцінювання, аналізу та розбудови варіантів структур локальних електротехнічних мереж – Microgrid. Автором в комплексі перспективних варіантів структур СЕП інплементовано декілька джерел генерації, розподільчі підстанції, регулятори потоків та комплекси накопичення ЕЕ. Такі варіанти Microgrid дозволяють потенційно функціонувати магістральним СЕП як в автономному режимі, так і в синергетичних комплексах з автономними електроенергетичними системами. Перевагою таких варіантів мікромережних технологій є їх простота та швидка адаптація до потреб споживачів, чого бракує при варіанті централізованого електропостачання від магістральних джерел ЕЕ.

Проте, варіант реструктуризації мікромереж СЕП залізорудних шахт не потребує такої технічної та технологічної складності як в архітектурі самих мереж, і, що особливо, в формуванні алгоритму та технічної реалізації систем керування.

Останнє для такого варіанту розбудови СЕП підземного підприємства обмежено в кордонах свого функціонування – повинно в автоматичному режимі (під контролем енергодиспетчера шахти) виконувати функцію «включити-виключити» в певний період годин доби, з безумовним відслідкуванням параметрів стану енергетики підприємства та захисним контролем цього процесу.

При цьому значний ефект досягається коли для функціонування АДЖ використовується існуючий на підприємстві потенціал ПЕР. Не цураючись інших джерел можливої генерації ЕЕ зазначимо, що як свідчать дослідження [104, 107-121] достатньо ефективним варіантом розбудови АДЖ в умовах залізрудних шахт є створення на базі існуючих ГВК пікових ГАЕС, котрі в періоди «пікових цін» за спожиту ЕЕ зможуть працюючи в генераторному режимі виробляти електричну енергію в достатньому для функціонування життєважливих споживачів шахти.

Спрощений варіант структурної еволюційної структури СЕП залізрудної шахти з включенням в неї АДЖ ЕЕ виглядає як наведено на рис. 4.1.

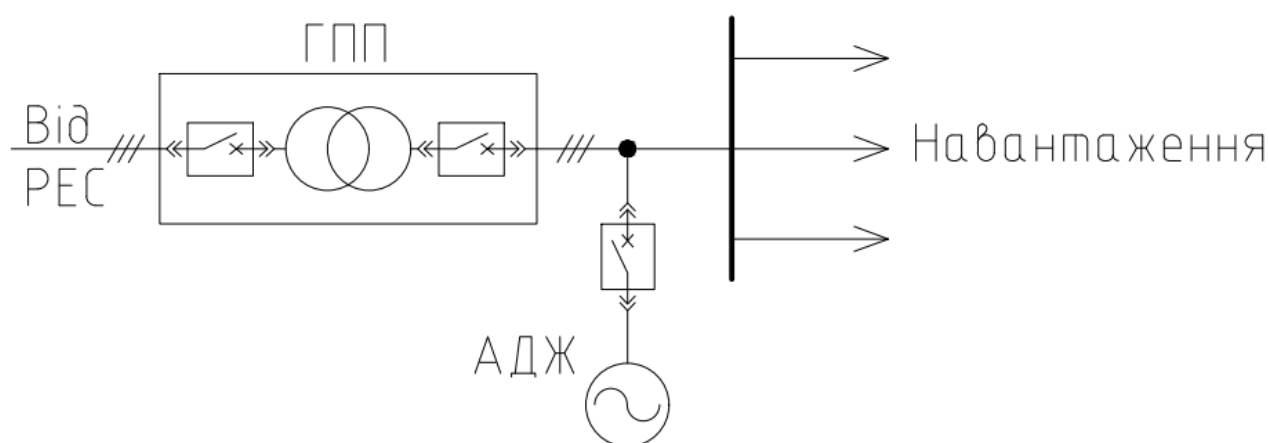


Рисунок 4.1 – Спрощений варіант еволюційної синергетичної структури електропостачання залізрудної шахти: РЕС – районна енергосистема; ГПП – головна понижувальна підстанція шахти; АДЖ – автономне джерело живлення

В дослідженнях [118, 121] за участю автора проведено аналіз та превентивне оцінювання потенційно реальних структур розбудови ГАЕС, як «пікових» варіантів генерації ЕЕ для умов їх функціонування в варіантах синергетичних структур електропостачання сучасних вітчизняних залізрудних шахт (Додаток Д). До вищезгаданого дослідження додано, що за той період часу, котрий промайнув з моменту виходу в світ цієї статті, пройшло не так вже й багато часу – менше одного року, проте багато чого змінилось в умовах нашої державної сучасності.

В сьогоднішній, саме існуюча політична ситуація диктує, підкреслимо, уже саме диктує, а не передбачає, необхідність в ствердженні таких варіантів ГАЕС для забезпечення надійності та безперебійності електропостачання як таких стратегічних для країни виробництв як гірничорудні, а й для життєдіяльності прилеглих до цих підприємств житлових місць мешкання людей. В такому баченні варіант «пікових» ГАЕС трансформується в варіант «резервних» чи «аварійних».

Проте, як перше так і друге ствердження, перед тим як стати варіантом реальної розробки, потребує свого детального оцінювання. Саме в такому ракурсі побудована тактика проведення досліджень даного розділу і дисертаційної роботи як завершеного наукового пошуку взагалі.

На рис. 4.2 наведена узагальнююча, зі всіх відомих, структура розбудови ГАЕС на основі шахтних ГВК (Додаток Д).

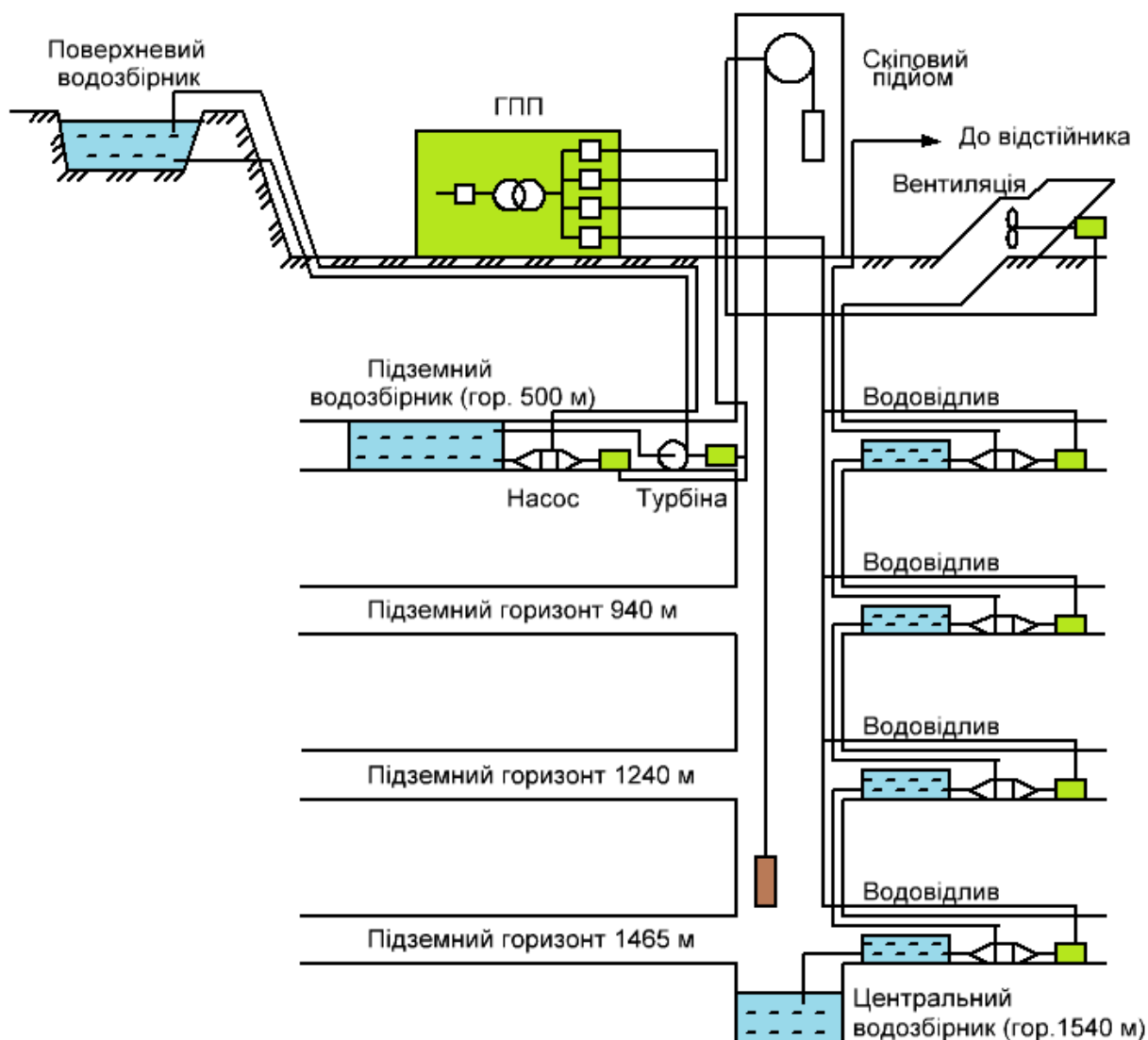


Рисунок 4.2 – Структурна схема шахтної пікової гідроакумуючої електростанції

4.2 Моделювання та превентивне оцінювання витрат електричної енергії згідно варіативності структур розбудови пікових гідроакумуючих електростанцій

За допомогою програмного забезпечення LabVIEW, розроблено програму (рис. 4.3) для обчислення витрат електричної енергії насосними установками протягом доби для умов конкретних параметрів діючих залізрудних шахт протягом доби.

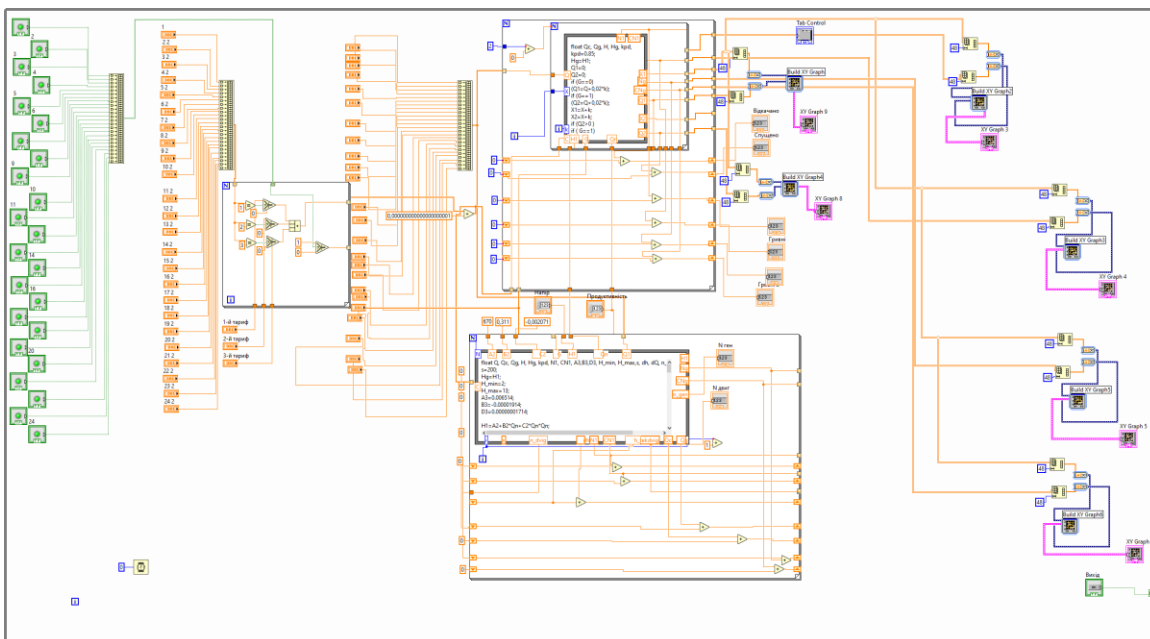


Рисунок 4.3 – Структура програми споживання та генерації електричної енергії піковими ГАЕС на залізрудних шахтах

Ця програма здатна на превентивному рівні дослідити та розрахувати основні параметри насосного агрегату, якій може працювати в тому числі в генераторному режимі.

У даній програмі вносяться дані щодо погодинної відкачки заданого об'єму води в $\text{м}^3/\text{год}$. Також алгоритм передбачає застосування тарифних зон диференційованих по періодам часу для оплати за електричну енергію.

При математичному моделюванні насосних установок залізрудних шахт об'єм відкачки води (рис. 4.4) на поверхню було встановлено на рівні 370 м^3 , що відповідає реаліям діючої шахти.

Провівши математичне моделювання отримано наступні результати. Протягом доби відкачано об'єму шахтних вод $8880 \text{ м}^3/\text{год}$, при цьому буде спожито електричної енергії двома насосними агрегатами $16729 \text{ кВт} \cdot \text{год}$.

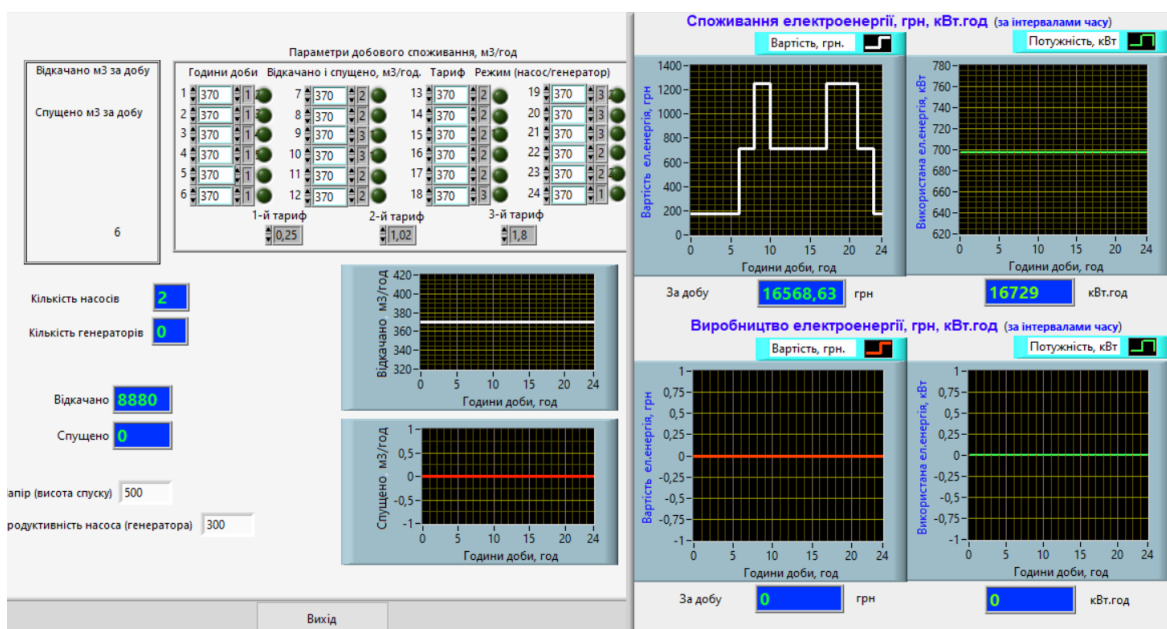


Рисунок 4.4 – Графік споживання електричної енергії протягом доби на залізорудній шахті

Також в програмі є частина в якій можливо обрахувати доцільність використання пікових ГАЕС в структурі насосних агрегатів залізорудних шахт. На рис. 4.5 вказано в які години доби буде працювати гідроакумуюча електростанція, і бачимо наступні данні що відкачано води з шахти 6660 м³/год, закачано назад до шахти 2220 м³/год, при цьому було згенеровано протягом доби 2183 кВт·год, що призведе до економії коштів на відкачку води за добу, причому буде вироблено електричної енергії за зеленим тарифом на рівні який становить 3 грн/ кВт·год за добу.

Отже математичне моделювання алгоритму роботи «розумної» системи керування підтверджує факт що є значний потенціал в створенні пікових ГАЕС на залізорудних шахтах.

Якщо збалансувати системи за значенням об'єму відкачки води, який повинен становити 8500 м³ за добу, то в даному варіанті потрібно підняти об'єм відкачки на рівень 615 м³/год. та провести перерозподіл часів генерації піковою ГАЕС протягом доби а саме на період з 9:00 – 18:00.

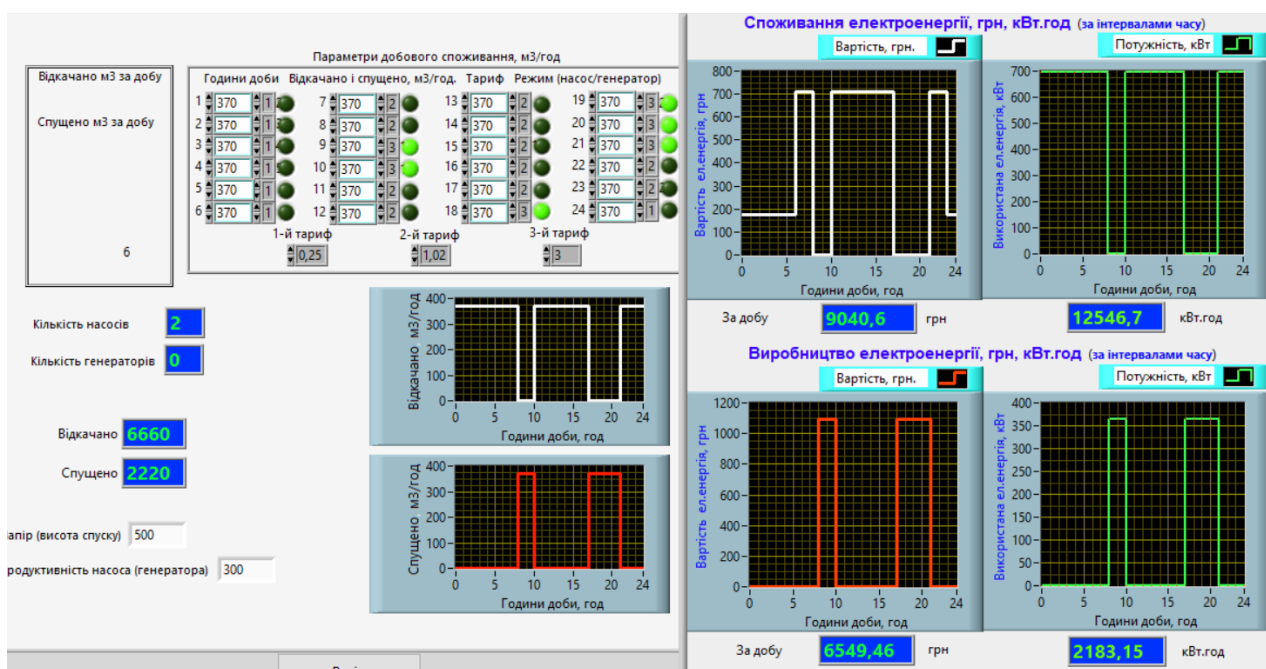


Рисунок 4.5 – Графік споживання та генерації електричної енергії протягом доби на залізорудній шахті

При моделюванні (рис. 4.6) отримано що протягом доби відкачаємо 8610 м^3 води із шахти, при цьому буде витрачено $16220 \text{ кВт}\cdot\text{год}$ електроенергії, а при генерації в зазначений період буде згенеровано $3638 \text{ кВт}\cdot\text{год}$ електроенергії. При цьому не знижується добовий графік відкачки води і генерується $3638 \text{ кВт}\cdot\text{год}$ електроенергії за допомогою пікової ГАЕС.

На наступному етапі досліджень проведено розрахунки для варіанту встановлення пікових ГАЕС з двома гідротурбіна на підземному горизонті 500 метрів типової залізорудної шахти. Така можливість забезпечується за рахунок підвищення гідроакumuлюючого потенціалу зумовленого використанням додаткових об'ємів вод з сусідніх шахт. Визначено витрати на експлуатацію та ремонт, чиста приведена вартість (NPV), приведений тариф (LCOE) на електроенергію у системах з піковою ГАЕС та без неї (живлення тільки від зовнішньої мережі).

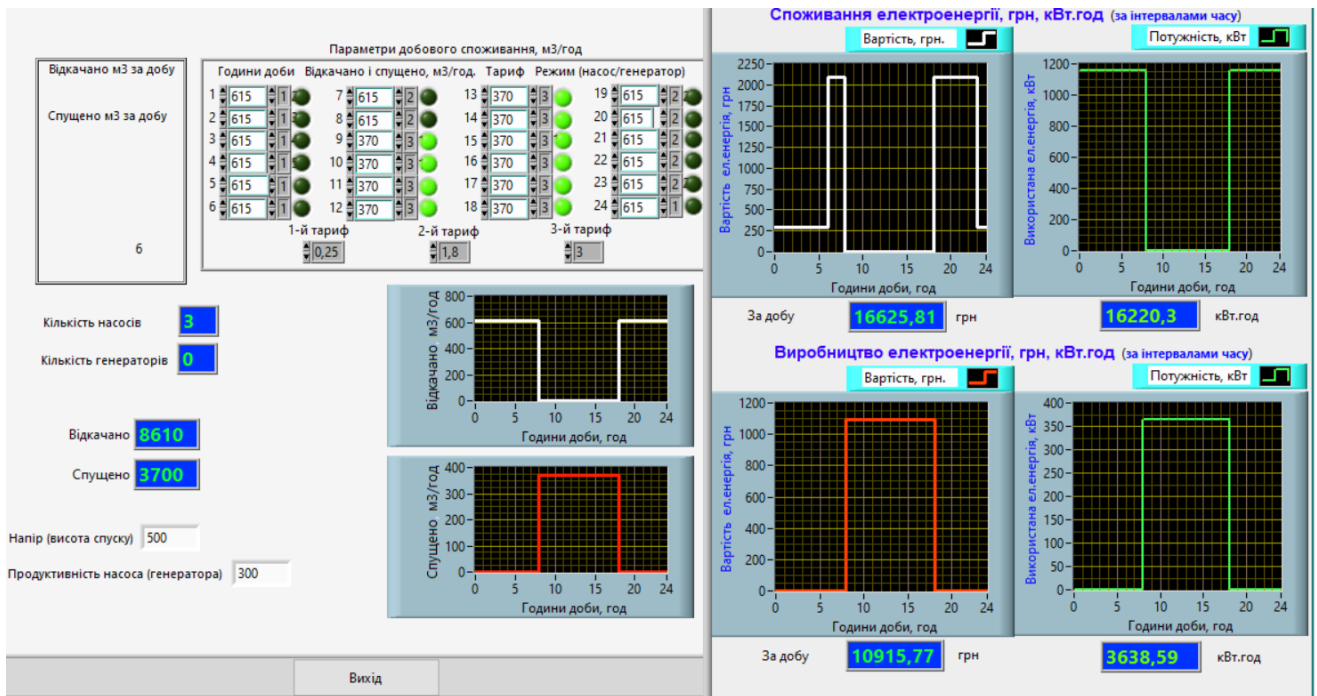


Рисунок 4.6 – Графік споживання та генерації електричної енергії протягом доби збалансованої системи на залізорудній шахті

Визначено витрати на експлуатацію та ремонт, чиста приведена вартість (NPV), приведений тариф (LCOE) на електроенергію у системах з піковою ГАЕС та без неї (живлення тільки від зовнішньої мережі).

Кращою системою вважається така, у якої NPV по модульному значенню нижче.

4.3 Оцінювання ефективності застосування гідроакumuлюючих електростанцій на основі комплексів водовідведення залізорудних шахт

4.3.1 Загальна характеристика порівнюваних конфігурацій систем електропостачання залізорудних шахт та умов проведення експериментальних досліджень

Для більшої реальності та наочності практичної реалізації теоретичних висновків викладених у попередньому розділі розглянемо очікувану

ефективність упровадження пікових ГАЕС для комбінованого живлення споживачів шахти розглянемо на прикладі варіативності водовідливу діючої шахти «Криворізька» (м. Кривий Ріг) для якої характерним є найбільш стресовим серед інших вітчизняних залізрудних шахт водоприплив. Основне технологічне обладнання водовідливу, а саме насоси та водозбірники, розміщуються на підземних горизонтах (рис. 5.1). При проведенні обчислювальних експериментів передбачається встановлення на ступенях водовідливу гідрогенераторів потужністю 1 МВт типу CJ A237-W-90/1x5,5 з номінальними параметрами, наведеними в табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Номінальні параметри гідротурбіни CJA 237

h, м	Q, м ³ /с	P, кВт	n, об/хв	Генератор	P _н , кВт	U, кВ
540	0,23	1075	1000	SFW 1000- 6/1180	1000	6300

Оцінимо гідроенергетичний потенціал кожної ступені водовідливу розрахувавши рівень генерації електроенергії гідротурбіною при максимально допустимому значенні витрат води [141]:

$$P = \eta \rho g h Q. \quad (4.2)$$

Для ступеневого скидання води між горизонтами 0, 500, 940, 1240, 1315 виробництво електроенергії становить 1015,3, 893,49, 609,2 і 152,3 кВт·год, відповідно. Отже, доцільно розглядати варіанти розміщення гідротурбін на горизонтах 500 і 940 метрів. Рівень генерації для відміток 940–1240 і 1240–1315 складає 60 % і 1,5 % від номінальної потужності гідроагрегату, що свідчить про нераціональний рівень його завантаженості.

Під час проведення досліджень розглянуто три конфігурації системи розподіленої генерації з використанням пікової ГАЕС:

1. Встановлення однієї гідротурбіни на горизонті 500 з використанням води однієї шахти;

2. Встановлення двох гідротурбін на горизонті 500 з використанням води декількох шахт;

3. Встановлення чотирьох гідротурбін: двох на горизонті 500 і двох на горизонті 940, з використанням води декількох шахт.

Для кожної конфігурації системи порівняльний аналіз проводився для двох варіантів живлення споживачів:

1. Від промислової електричної мережі, електропостачання якої здійснюється від зовнішньої енергосистеми.

2. Комбіноване живлення електричної мережі та пікової ГАЕС.

Перший варіант передбачає придбання електроенергії в електропостачальній компанії за чинними тарифами, що задовольняє потреби об'єкта в повному обсязі. Другий – електропостачання насосів водовідливу від гідрогенератора пікової ГАЕС та отримання електроенергії від мережі підприємства у випадку дефіциту потужності, зумовленого або збільшенням споживання через уведення в дію додаткових насосів при збільшенні водоприпливу в шахту, або зменшення витрат води, що проходить через гідроагрегат.

Критерієм для порівняння ефективності двох варіантів виступає значення чистої приведеної вартості системи (Net present value) [142]:

$$NPV = \sum_{i=1}^N \frac{R_i}{(1+d)^i}, \quad (4.3)$$

де R_i – різниця між прибутком і витратами при функціонуванні системи, грн;

d – облікова ставка;

N – кількість років експлуатації системи.

Враховуючи, що розглядається окремо лише енергосистема підприємства та не передбачається продаж електроенергії, яка вироблена об'єктами розподіленої генерації, зовнішнім споживачам, то при визначенні значення NPV

використовуються лише розрахункові показники: вартість електроенергії придбаної у електропостачальної компанії, капітальні витрати на придбання та монтаж генеруючого обладнання, а також річні експлуатаційні витрати та вартість планово-попереджувальних ремонтів. Оскільки доходна частина відсутня, то NPV завжди прийматиме негативне значення. Переважним буде варіант системи, при якому NPV буде найменшим. Для зручності використовується модульне значення витрат.

Економічний показник використовується при моделювання для урахування витрат на придбання й обслуговування генеруючого обладнання пікової ГАЕС.

Очевидним критерієм ефективності системи міг би виступати обсяг потужності, отриманий із зовнішньої енергосистеми й оплачений за чинними тарифами електропостачальної компанії. Проте він є нерепрезентативним, оскільки наявність додаткового джерела живлення в будь-якому випадку призведе до зменшення рівня електроенергії, що споживається від зовнішньої електричної мережі.

У процесі проведення обчислювальних експериментів використовувалося програмне забезпечення MATLAB.

При моделюванні номінальне електричне навантаження здавалося рівномірно розподіленим протягом доби із середнім і піковим значенням потужності 900 кВт та середньодобовим споживанням 21600 кВт·год. Також обчислення здійснюється для випадків уведення в роботу додаткового електрообладнання, коли середньодобове споживання збільшується до 43200 кВт·год, та зменшується до 10800 кВт·год.

Обчислення варіанта із застосуванням пікової ГАЕС ураховує капіталовкладення на придбання гідротурбіни вартістю 540 тис. грн, а також різні витрати на планово-попереджувальні ремонти й обслуговування в розмірі 80 тис. грн на рік. Виробництво електроенергії піковою ГАЕС відбувається при номінальному гідростатичному напорі 500 м (відм. 0–500) і 440 м (відм. 500–940)

і втратах у гідравлічній системі 15 %. Протягом моделювання змінювалося значення витрати води, що проходить через гідротурбіну, у бік зменшення від номінального значення. Ці значення фіксувалися на таких рівнях, як 0,23; 0,15; 0,07 м³/с. ККД гідротурбіни становить 90 %. Вартість електроенергії, яку отримує підприємство від електропостачальної компанії, складатиме 93,38 грн/МВт·год, як для непобутових споживачів першої категорії. До того ж додаткове моделювання проведено й для вартості електроенергії в години пік. Це – 140,07 грн/ МВт·год.

Під час моделювання було визначено термін експлуатації системи – 25 років, при цьому номінальна облікова ставка становила 8 %.

4.3.2 Узагальнення результатів модельних досліджень з оцінюванням варіантів ефективності застосування пікових гідроакumuлюючих електростанцій на основі водовідливних комплексів залізорудних шахт

Аналіз різних конфігурацій систем електропостачання споживачів для умов конкретної залізорудної шахти, зокрема, зі встановлення однієї або двох гідротурбін на горизонті 500 метрів та чотирьох гідроагрегатів – по два на горизонтах 500 і 940 метрів шахти «Криворізька» (м. Кривий Ріг) продемонстрував, що пікові ГАЕС найбільш доцільно застосовувати, коли генерована потужність близька до встановленої потужності споживачів (Додаток Д). При цьому застосування різних критеріїв для визначення найбільш ефективної конфігурації системи електропостачання демонструють протилежні результати. Так, наприклад, з точки зору вартості електроенергії найсприятливішими умовами для впровадження системи розподіленої генерації продемонстрував випадок зі встановленням однієї гідротурбіни на горизонті 500 метрів. У такому випадку приведена вартість електроенергії перевищувала діючий тариф практично для всіх розглянутих умов функціонування, окрім випадків з дуже малими витратами води через гідроагрегат. Це зумовлюється

оптимальним співвідношенням між, з одного боку, капіталовкладеннями на придбання обладнання пікової ГАЕС та вартістю його обслуговування і планово-попереджувальних ремонтів, з іншого – рівнем покриття потреб споживачів згенерованою електроенергією.

Проте аналіз величини NPV показав, що при умовах близьких до номінальних, використання пікової ГАЕС з однією гідротурбіною має найвищу приведену вартість через низький рівень генерації, що зумовлює недоцільність застосування порівняно з іншими конфігураціями.

Найкращим варіантом для впровадження при піковому тарифі виявилася система з піковою ГАЕС, що містить чотири гідроагрегати на горизонтах 500 і 940 метрів. Він продемонстрував найнижче значення NPV в умовах близьких до номінальних та найвищу область раціонального використання у розглянутих межах зміни електроспоживання та витрат води через гідротурбіни.

При базовому тарифі доцільно застосовувати систему розподіленої генерації тільки з двома гідроагрегатами на горизонті 500 метрів. Вона має найвище значення області раціонального використання серед усіх досліджених конфігурацій.

Таким чином, найбільшого економічного ефекту можна досягти шляхом впровадження пікової ГАЕС, що складається з чотирьох гідротурбін, дві з яких будуть використовуватися у години дії базового тарифу, а у інший час, коли використовується піковий тариф, будуть задіяні усі агрегати. Таке балансування повинно реалізовуватися системою керування електропостачанням споживачів шахти.

4.4 Висновки до розділу 4

1. Виконані дослідження демонструють доцільність застосування пікових гідроакumuлюючих електростанцій для розподіленої генерації при електропостачанні споживачів гірничих підприємств. Використання таких

автономних енергетичних об'єктів, що виробляють електроенергію за рахунок власних ПЕР, дозволяє підвищити надійність та безперебійність постачання електричної енергії таких видів промислових підприємств з безперервним циклом функціонування як залізорудні шахти, а, за умови достатньої встановленої потужності генеруючого обладнання, й автономну роботу електричної мережі протягом плануємої необхідного часу. Особливо слід відзначити, що таким чином розподілена генерація електричної енергії внутрішніми енергосистемами створює передумови для гнучкого керування комплексом «електропостачання – електроспоживання» даних видів промислових підприємств за рахунок наявності локальних маневрових потужностей. Такий підхід дозволяє знизити залежність від коливань добових тарифів на електроенергію у різний час доби, яке встановлюється компанією, що здійснює централізоване електропостачання. Усі ці фактори забезпечують зниження долі енергетичної складової в собівартості кінцевого продукту гірничого виробництва.

2. Задіяння гідроенергетичного потенціалу шахт і рудників, на відміну від традиційних відновлюваних джерел енергії – сонця та вітру, має ряд позитивних особливостей. Головною з цих є їх стійкий характер, що дозволяє виробляти електроенергію саме коли потрібно, а не тоді, коли для цього існують атмосферні передумови. Це також здешевлює вартість таких електростанцій через відсутність необхідності створення додаткових акумулюючих потужностей на основі, наприклад, вторинних хімічних джерел електричної енергії. Роль таких умовних накопичувачів енергії в пропонуємому варіанті відіграють водозбірники, які вже є у складі об'єктів, що реалізують відведення підземних ґрунтових вод.

3. Застосування пікових ГАЕС в умовах конкретних залізорудних шахт дозволить підвищити ефективність електропостачання споживачів за рахунок зменшення витрат на придбання електроенергії з зовнішньої енергосистеми. Це забезпечить зниження собівартості кінцевої продукції та підвищення її конкурентоздатності на світовому ринку сировини.

Разом з тим, для дотримання належного рівня виробництва електроенергії, необхідно підтримувати рівень інтенсивності водного потоку, що проходить через гідротурбіну, вище певної межі. Також при підвищенні встановленої потужності споживачів виробничого об'єкту ефективність системи комбінованого електропостачання знижується внаслідок виникнення дефіциту потужності, яку генерує енергетичний гідроагрегат.

Тому доцільність застосування пікової ГАЕС повинна досліджуватися у кожному окремому випадку.

4. Наступним етапом удосконалення енергосистем гірничих підприємств, після впровадження автономних джерел генерації електричної енергії – систем розподіленої генерації, є реалізація алгоритмів інтелектуального керування комплексом «електропостачання – електроспоживання» з використанням концепції Smart Grid. При такому підході керування здійснюється практично в режимі реального часу, що забезпечує оперативне реагування на зміни стану енергосистеми та дозволяє оптимізувати її роботу залежно від поточного рівня енергоспоживання, потенційних обсягів власної генерації та діючого тарифу на електроенергію.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційному дослідженні запропоновано та викладено нове бачення вирішення актуальної наукової задачі – розроблення методів та заходів підвищення електроенергоефективності гірничовидобувних підприємств шляхом підвищення енергоефективності процесу функціонування головних водовідливних комплексів залізорудних шахт. Основні результати наукових досліджень та теоретичні викладки, щодо їх реалізації в практику функціонування електроенергетичного комплексу гірничовидобувних підприємств, форматизовано наступними положеннями.

1. На основі аналізу результатів експериментальних досліджень, на тлі, відповідно зкорегованої в діючому часі лінійки енергоємних споживачів електричної енергії гірничорудних підприємств з підземними способами видобутку залізорудної сировини, диференційовано оцінено та визначено найбільш значимий суб'єкт по рівню впливу на загальні показники електроспоживання даних підприємств – головні водовідливні комплекси. Проведено оцінювання впливу електроенергетики головних водовідливних комплексів на загальний обсяг та траєкторію коливань добових рівнів споживання електричної енергії, даних підприємств дозволило виявити вхідні параметри для практичної реалізації шляхів з підвищення енергоефективності як даного виду споживачів так і підприємства в цілому.

2. Проведений ґрунтовний аналіз сучасного стану споживання електричної енергії водовідливних комплексів залізорудних підприємств дозволяє стверджувати про відсутність системної методики відслідковування відповідних процесів. Всебічність проведених досліджень дозволяє стверджувати про можливість і доцільність застосування виокремлених груп показників як систему оцінювання споживання та вартості електричної енергії водовідливними залізорудних підприємств. Проведений системний аналіз

складників щодо виміру та вартості спожитої електричної енергії водовідливними комплексами дає підстави запропонувати систему збалансованих кількісних показників оцінювання цих показників в умовах залізорудних підприємств, яка містить такі компоненти як: обсяг споживання ЕЕ кВт/год.; водоприплив; підземний горизонт, м; потужність насосу, кВт; кількість насосів, шт.

3. Формування інформаційно-аналітичного забезпечення щодо споживання електроенергії головними водовідливними установками на залізорудних підприємствах певною мірою залежить від технології видобутку залізорудної сировини, термін експлуатації технічному стану та ефективності обладнання, мотивації та навичок обслуговуючого персоналу тощо. Запропонований термін „енергетична інформаційна система”, що змістовно визначає систему, підтримує збір та інтерпретацію формування комплексної оцінки електроспоживання взагалі, та водовідливними комплексами зокрема, з метою вимірювання та перевірки енергії продуктивності дозволяє системно вести пошук заходів та їх можливостей для оптимізації обсягів споживання енергії з можливістю досяжності економічно орієнтованого рівня витрат підприємств-споживачів на її сплату. Наразі головна роль належить загальним кількісним показникам, які є підґрунтям щодо форматизації структури оптимального споживання електроенергії залізорудними підприємствами взагалі та їх водовідливними комплексами зокрема. Запропоноване використання методики оцінювання ефективності споживання та відповідної вартості електроенергії містить такі складові: збирання поточної інформації щодо споживання та вартості електроенергії водовідливними комплексами; розподіл зібраної інформації по часовому проміжку; вибір найбільш впливових факторів; побудова та аналіз багатфакторної моделі. Практика застосування запропонованої методики довела її дієвість на залізорудних підприємствах.

4. Запропонована варіативність логістики розбудова «АСК електропостачання – електроспоживання» гірничорудних підприємств з підземними способами видобутку залізорудної сировини з деталізацією в цій структурі підсистеми керування процесом енергоспоживання комплексами відведення підземних вод, дозволяє визначити дороговказ з підвищення електроенергоефективності гірничорудних видів підприємств – створення синергетичного енергетичного комплексу на базі головних водовідливних шахт.

5. З використанням програмного модуля Fuzzy Logic Toolbox пакету MATLAB змодельовано алгоритм функціонування АСК з одно- і багатоканальним нечіткими регуляторами для керування споживанням електроенергії водовідливним комплексом на основі застосування одного, двох або трьох керуючих впливів та двох альтернативних підходів: мінімаксного (за 2-ма критеріями) або оптимального (за установкою). Використання двоставкового («Ніч/Пік») тарифу без застосування інтелектуальних нечітких АСК веде до збільшення добових витрат на спожиту електроенергію на 12,88 % при одноканальному регулюванні водовідведення і відповідно на 7,1 % при двоканальному керуванні рудопотоком та водовідливом одночасно. Однак, застосування нечітких регуляторів дозволяє компенсувати ці втрати. При верифікації результатів комп'ютерного моделювання використовуючи реальну статистику роботи ряду діючих залізорудних шахт встановлено та оцінено, що застосування АСК нечітким 3-х канальним регулюванням рудопотоку, водовідливу та вентиляції дозволяє в умовах двоставкового тарифу (за рахунок більш раціонального перерозподілу за добовими інтервалами) скоротити матеріальні витрати за спожиту електроенергію (наприклад, за даними шахти «Криворізька» (м. Кривий Ріг), зі збільшенням добового споживання ЕЕ на 4,45 % (загальні витрати скорочуються 2,5 %).

6. Методологія яка пропонується щодо технології розбудови та функціонування в складі «АСК електропостачання-електроспоживання»

гірничорудних підприємств підсистеми керування водовідливним комплексом носить уніфіковану структуру та з відповідним рівнем необхідного корегування може застосовуватись в інших варіантах керування складовими електроенергетики підприємств, з певною варіативністю вхідних і вихідних параметрів, згідно відповідної мети досліджень, предмету наукового пошуку, поставлених та формалізованих напрямків науково-практичного пошуку.

7. Виконані дослідження продемонстрували що головні водовідливні комплекси залізорудних шахт являють собою готові, або обмежено готові технологічні структури для розбудови на їх основі автономних пікових гідроакumuлюючих електростанцій з потенціалом рівнів електричних потужностей достатніх для повного забезпечення енергетичних потреб всіх електроспоживачів - приймачів електроенергії гірничорудного підприємства. Доцільність застосування в складі «АСК електропостачання-електроспоживання» пікових гідроакumuлюючих електростанцій являє собою варіант розподіленої генерації при електропостачанні приймачів гірничорудних підприємств. Використання таких додаткових енергетичних об'єктів, що виробляють електроенергію, дозволяє підвищити надійність та забезпечити безперебійність функціонування енергосистем даних видів промислових підприємств, а, за умови достатньої встановленої потужності генеруючого обладнання, й забезпечити автономну роботу електричної мережі в повному протязі необхідного періоду часу. Особливо слід відзначити, що розподілена генерація електричної енергії створює передумови для гнучкого керування комплексом «електропостачання – електроспоживання» гірничорудного підприємства за рахунок наявності локальних маневрових потужностей. Такий підхід дозволяє знизити залежність від коливань тарифу на електроенергію у різний час доби, яке встановлюється компанією, що здійснює централізоване електропостачання. Усі ці фактори забезпечують зниження долі енергетичної складової в собівартості видобутку залізорудної сировини та мінімізує

негативний вплив на режим функціонування гірничого виробництва від втрати централізованого електропостачання.

8. Задіяння енергетичного потенціалу відкачуємих з робочих просторів шахт і рудників ґрунтових вод, на відміну від традиційних відновлюваних джерел енергії – сонця та вітру, має ряд позитивних особливостей. Головною з яких є їх стійкий характер, що дозволяє виробляти електроенергію саме коли потрібно, а не тоді, коли для цього існують атмосферні передумови. Це також здешевлює вартість таких автономних електростанцій через відсутність необхідності створення акумулюючих потужностей на основі вторинних хімічних джерел струму. Роль таких умовних накопичувачів енергії відіграють водозбірники, які вже є у складі об'єктів, що реалізують відведення ґрунтових вод. Також відзначимо, що особливості гірничого виробництва в принципі ускладнюють розміщення потужного генеруючого обладнання для вітро- або геліоелектростанції всередині або у безпосередній близькості до шахт та рудників. Тому використання пікових гідроакumuлюючих електростанцій на основі ГВК залізорудних шахт стає практично безальтернативним.

9. Доцільним продовженням процесу підвищення енергоефективності гірничорудних підприємств після впровадження систем електропостачання з розподіленою генерацією повинен стати етап розробки та впровадження інтелектуального керування комплексом «електропостачання-електроспоживання» з використанням концепції Smart Grid. При цьому керування повинно здійснюватися в режимі реального часу, що забезпечить оперативне реагування на зміни параметрів стану енергосистеми та дозволить оптимізувати її роботу залежно від поточного рівня енергоспоживання, потенційно необхідних обсягів власної генерації з врахуванням діючого тарифу на електроенергію.

10. Втілення наукових розробок, які викладені в дисертаційній роботі, за оцінкою автора та згідно розрахунків спеціалізованих підприємств з розробки та

впровадження систем електропостачання в практику роботи підземних гірничорудних підприємств, дозволить отримати очікуємий економічний ефект та забезпечити надійність та безперебійність електропостачання стратегічних для України підприємств гірничорудної галузі. Теоретичні аспекти та практичні розробки щодо впровадження АСК водовідливними комплексами залізорудних підприємств втілені в практику проведення учбово-педагогічної роботи з студентами спеціальності 141 – електроенергетика, електротехніка та електромеханіка в Криворізькому національному університеті (Додаток Д).

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] Енергетична стратегія України на період до 2030 р. [Електронний ресурс] / Міністерство енергетики та вугільної промисловості України, 2014. – Режим доступу: <https://mpe.kmu.ua/fuel/control/uk/doccatalog/list?currDir=50358>.
- [2] С. Денисюк, та В. Таргонський, “Енергоефективність України: проблеми та шляхи її зростання”, *Енергетика: економіка, технології, екологія. Загальні проблеми енергоефективності*, № 4, с. 7-28, 2017.
- [3] Енергетична ефективність України. Кращі проектні ідеї [електронне видання]: Проект «Професіоналізація та стабілізація енергетичного менеджменту в Україні» / Уклад.: С. П. Денисюк, О. В. Коцар, Ю. В. Чернецька. – К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2016. – 79с.
- [4] С. Денисюк, Г. Стрелкова, К. Пфайфер, М. Стрелков, та О. Іщенко “Європейські тенденції інноваційного розвитку в енергетичному секторі та сферах кінцевого енергоспоживання”, *Енергетика: економіка, технології, екологія*, №2. с.7-19. 2018.
- [5] Енергетична стратегія України на період до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність». Розпорядження Кабінету Міністрів України від 18 серпня 2017 р. № 605-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/605-2017-p> (дата звернення: 11.12.2019).
- [6] О. Синчук, І. Синчук, І. Козакевич, В. Федотов, В. Серебренников, Н. Лохман, Т. Беридзе, С. Бойко, А. Пироженко, та А. Ялова. “Разработка функциональной модели управления уровнями потребления электроэнергии подземными железорудными предприятиями”, *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. № 6(3), с.20-27. 2018.
- [7] В. Розен, І. Соколовська, Є. Іншеков, та І. Стоянкова. “Удосконалення механізму впровадження директиви 2012/27/EU про енергоефективність шляхом

адаптації міжнародних стандартів з енергоменеджменту на національному рівні”, *Проблеми загальної енергетики*, вип.4(43), с. 52-57, 2015.

[8] В. Рябець, А. Долгий, та В. Тарасютін. “Підготовка та відпрацювання природно-багатих залізородних покладів в умовах глибоких горизонтів”, *Сталий розвиток промисловості та суспільства: мат. конф. - Кривий Ріг*, Том 1, с. 3, 2012. <http://ds.knu.edu.ua/ispui/handle/123456789/1241>

[9] М. Ступнік, М. Федько, С. Письменний та ін. “Проблеми розкриття та підготовки рудних родовищ на глибоких горизонтах шахт Кривбасу”, *Вісник Криворізького національного університету*, Кривий Ріг, Вип. 47, с. 3-8, 2018. doi: 10.31721/2306-5451-2018-1-47-3-8.

[10] Є. Бабець, І. Мельникова, С. Гребенюк, та С. Лобов. *Дослідження техніко-економічних показників гірничодобувних підприємств України та ефективності їх роботи в умовах змінної кон'юнктури світового ринку залізородної сировини*. НДГРІ ДВНЗ «КНУ», Кривий Ріг, Вид. Р.А. Козлов, 2015.

[11] Ю. Капленко, и Е. Янов. “Влияние глубины горных работ на технико-экономические показатели подземной добычи руды”, *Вісник КТУ*, №5(15), с. 25-28, 2006.

[12] O. Sinchuk, A. Kupin, I. Sinchuk, M. Rohoza, and P. Plieshkov. “Certain aspects concerning the development of a functioning scheme of the auto-mated system to control energy flows of underground iron-ore enterprises”, *Mining of mineral deposits*, Volume 14, Issue 3, p. 101-111, 2020.

[13] А. Дремин. “Стратегия энергосбережения при добыче и переработке железных руд”, *Горный журнал*, № 12, с. 45-47, 2006.

[14] В.І. Волинець. “Аналізування ефективності споживання електроенергії вугільними шахтами”, *Енергетична безпека навколишнього середовища: Матеріали міжнародної науково-практичної конференції*, Луцьк, РВВ ЛНТУ, с. 35 -37, 2012.

[15] S. Boiko, I. Sinchuk, F. Karamanyts, I. Kozakevych, M. Baranovska, and O. Yalova, *Aspects of the problem of applying distributed energy in iron ore enterprises' electricity supply systems*. Warsaw, Poland: «iScience» Sp. z o. o., 2018.

[16] I. Sinchuk. "Harmonization of modeling systems for assessing the electric power consumption levels at mining enterprises", *Mining of Mineral Deposits*, 12, pp.100-107, 2018.

[17] D. Batrakov. "Analysis and features of increasing methods energy efficiency of mining pumping water dispensing plants by electric drive", *Gomy Vestnik*, 96, pp. 271-275, 2013.

[18] H. Brand, J. Vosloo, and E. Mathews. "Automated energy efficiency project identification in the gold mining industry", *Proceeding of the 13th Conference on the Industrial and Commercial use of Energy*, pp. 17-22, 2015.

[19] G. Pivnyak, V. Samusia, Y. Oksen, and M. Radiuk. "Efficiency increase of heat pump technology for waste heat recovery in coal mines", *New Developments in Mining Engineering*, pp. 1-4. 2015.

[20] В. Розен, та Н. Нечипоренко. "Виявлення споживачів-регуляторів електричної потужності", *Вісник НТТУ "КПІ", серія "Гірництво"*, №1, с. 127-130, 1999.

[21] Г. Хронусов. "Оценка эффективности функционирования комплексов потребителей-регуляторов мощности горных предприятий", *Известия вузов. Горный журнал*, №10, с. 89-94, 1988.

[22] O. Sinchuk, I. Sinchuk, I. Kozakevych, V. Fedotov, V. Serebrenikov, N. Lokhman, T. Beridze, S. Boiko, A. Pyrozhenko, and A. Yaloya. "Development of the functional model to control the levels of electricity consumption by underground iron-ore enterprises", *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*, №6(3), с. 20-27, 2018.

[23] I. Sinchuk, S. Boiko, M. Baranovska, I. Kozakevich, A. Syomochkyn, D. Kalmus, I. Peresunko, M. Vinnik, N. Lokhman, and V. Chornay. *Brief commentaries*

on the problem of power consumption management at iron ore underground mines. Warsaw, Poland: «iScience», 2019.

[24] O. Sinchuk, A. Kupin, I. Sinchuk, O. Dozorenko and R. Krasnopolsky, “Algorithms Design for Fuzzy Control by Power Streams in Conditions of Underground Extraction of Iron Ore”, *2020 IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems (ESS)*, pp. 330-334, 2020.

[25] О. Синчук, А. Купин, И. Синчук, И. Козакевич, и О. Дозоренко. “Оптимизация энергопотребления в условиях железорудных шахт на основе применения нечеткой логики”, *Електричні і енерго-зберігаючі системи*, Кременчук, КрНУ, Вип.3(47), с.58-65, 2019.

[26] O. Sinchuk, A. Kupin, I. Sinchuk, M. Rohoza, and P. Plieshkov. “Certain aspects concerning the development of a functioning scheme of the automated system to control energy flows of underground iron-ore enterprises”, *Mining of Mineral Deposits*, №14(3), pp. 101-111, 2020.

[27] O. Sinchuk, A. Kupin, I. Sinchuk, O. Dozorenko, and R. Krasnopolsky “Algorithms Design for Fuzzy Control by Power Streams in Conditions of Underground Extraction of Iron Ore”, *Published 2020 IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems (ESS)*, pp. 101-111, 2020. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9160168>

[28] А. Купін, І. Сінчук, та В. Барановський. “До тактики розбудови архітектури узагальненого алгоритму енергоорієнтованого керування електроспоживанням підземних залізорудних підприємств”, *Електричні і енерго-зберігаючі системи*, Кременчук, КрНУ, Вип.1/(53), с.51-63, 2021.

[29] K. Budnikov, O. Sinchuk, I. Sinchuk, T. Beridze, Y. Filipp, O. Dozorenko, and R. Strzelecki. “Assessment of the factors influencing on the formation of energy-oriented modes of electric power consumption by water-drainage installations of the mines”, *Mining of Mineral Deposits*, Vol. 15, no 4, pp. 25-33, 2021. <https://doi.org/10.33271/mining15.04.025>.

[30] Будніков К. В., Сінчук О. М., Купін А. І., Сінчук І. О., и Барановська М. Л. “До розробки алгоритму енергоефективного керування електроенергетичним комплексом з розділеною генерацією електричної енергії в умовах залізрудних шахт”. *Вісник Криворізького національного університету*, №53, 2021, с. 118-126. <https://doi.org/10.31721/2306-5451-2021-1-53-112-118>

[31] Ю. Разумний, та А. Рухлов. *Аспекти вирішення проблем нерівномірності споживання електричної енергії*. Д.: Національний гірничий університет, 2012.

[32] Ю. Разумний. *Режими електроспоживання вугільних шахт*. Д.: НГА України, 2002.

[33] Ю. Разумный, и В. Герасимович. *Оценка дополнительных технологических устройств для регулирования режимов электропотребления на угольных шахтах*. Энергоатомиздат «Промышленная энергетика», 1987.

[34] Г. Пивняк, Ю. Разумный, и В. Заика. “О выборе способа регулирования режимов электропотребления”, *Всесоюзная научная конференция «Пути экономии и повышение эффективности режимов электропотребления» (доклады)*, Смоленск, 1987.

[35] Ю. Разумный, В. Герасимович, и В. Мочков. *Эффективность потребителей-регуляторов электрической нагрузки на угольных шахтах*. Уголь Украины, 1988.

[36] Ю. Разумный, и А. Рухлов. “Принципы управления режимами электропотребления при ограничениях электроснабжения”, *Наукові праці ДонНТУ, Електротехніка і енергетика*, Донецьк: РВК ДонНТУ, №79, 2004.

[37] А. Праховник. “Исследование электрических нагрузок и разработка экономически целесообразных графиков электропотребления ЦПП угольных шахт”, автореф. дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук, Киев, 1971.

[38] А. Праховник, В. Розен, та В. Майстренко. “Вимірювання графіків електричних потужностей енергосистем за допомогою споживачів-регуляторів

дискретної дії”, *Математичне моделювання в електротехніці й електроенергетиці: тези доповідей 1-ої міжнародної наук. техн. конф.* Львів, 19-22 вересня, с. 269-270, 1995.

[39] В. Розен. “Оперативное планирование и управление электрической нагрузки промышленных предприятий (на примере угольных шахт)”, автореф. дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук, Киев, 1983.

[40] В. Розен, та Н. Нечипоренко. “Виявлення споживачів-регуляторів електричної потужності”, *Вісник НТТУ КПП, серія Гірництво*, №1, с. 127-130, 1999.

[41] Г. Хронусов. “Оценка эффективности функционирования комплексов потребителей-регуляторов мощности горных предприятий”, *Известия вузов. Горный журнал*, №10, с. 89-94, 1988.

[42] В. Гордеев. *Регулирование максимума нагрузки промышленных электрических сетей*. М.: Энергоатомиздат, 1986.

[43] Е. Червонный. “Методы исследования возможностей регулирования электропотребления промышленных предприятий”, *Электромеханика*, №9, с. 47-51, 1988.

[44] М. Рыльникова, В. Олизаренко, С. Линьков, и Ар. Зубков. “Исследование потенциала перемещаемых потоков в горнотехнической системе подземного рудника для воспроизводства электроэнергии”, *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно - технический журнал)*: № 1/10, с. 55-64, 2015.

[45] М. Рыльникова, С. Линьков, и В. Олизаренко “Энергосберегающая система электроснабжения шахт с аккумуляцией электроэнергии”, *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно- технический журнал)*, № 1/8, с. 65-72, 2015.

[46] Е. Червонный. “Методы исследования возможностей регулирования электропотребления промышленных предприятий”, *Электромеханика*, №9, с. 47-51, 1988.

[47] Н. Даньшин. “К энергосбережению через инновации”, *Интернет проект Угольный портал*, 2009. [Режим доступа к журн.: http://www.coal.dp.ua/index.php?option=com_content&view=article&id=264: 2009-07-06-18-33-32&catid=146:energy1&Itemid=50]

[48] O. Sinchuk, A.Kupin, I. Sinchuk, I. Kozakevych, and I. Peresunko “Simulating of fuzzy controlling of power streams in conditions of underground extraction of iron ore”, *Праці міжнародної науково-технічної конференції «Проблеми сучасної електротехніки - 2020 (ПСЕ-2020)»*, 8 - 12 червня, Київ, Україна. НТУУ "КПІ ім. І. Сікорського", 2020.

[49] К. Будніков, І. Козакевич. “Базові принципи формування предиктивних систем керування електроприводами змінного струму”, *Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «Розвиток промисловості та суспільства»*, Криворізький національний університет, с. 62, 2021.

[50] А. Купін. *Інтелектуальна ідентифікація та керування в умовах процесів збагачувальної технології*. Кривий Ріг, КТУ, 2008.

[51] A., Kupin, A. Senko. “Principles of intellectual control and classification optimization in conditions of technological Processes of beneficiation complexes”, *CEUR Workshop Proceedings*, pp. 153-160, 2015.

[52] І. Сінчук. “Формалізація показників балансу споживання електричної енергії підземними залізрудними підприємствами”, *Гірничий вісник*, Кривий Ріг, Вип. 105, с. 132–138, 2019.

[53] I. Sinchuk, K. Budnikov, and R. Krasnopolksky. *Fundamentals of integrating smart technologies for controlling power systems at iron ore underground mining enterprises*. Warsaw: iScience Sp. z.o.o., 2021.

[54] Є. Бодянський, Є. Кученренко, О. Михальов, В. Філатов, та М. Гасик *Методи обчислювального інтелекту в системах керування технологічними процесами феросплавного виробництва*. Дніпропетровськ: НМетаУ, 2011.

[55] Енергетична політика за межами країн – членів МЕА: Україна 2012. Основні положення та рекомендації. *Загальна енергетична політика. OECD/IEA: International Energy*, с. 42, 2012.

[56] А. Шидловський, Г. Півняк, М. Рогоза, та С. Випанасенко. *Геоелектроенергетика та геополітика України*. Д.: Національний гірничий університет. 2007.

[57] Б. Стогній, О. Кириленко, та С. Денисюк. “Інтелектуальні електричні мережі електроенергетичних систем та їхнє технологічне забезпечення”, *Технічна електродинаміка*, №6, с. 44-50, 2010,

[58] Б. Стогній, А. Буткевич, Е. Зорин, А. Левконюк, и В. Чижевский. “Проблемно-ориентированный мониторинг режимов энергообъединения”, *Технічна електродинаміка*, №6, с. 52-59. 2008,

[59] П. Лежнюк, О. Рубаненко, та І. Гунько. “Оптиміальне керування потужністю генерування розосередженими джерелами енергії в локальних електроенергетичних системах”, *International research and practice conference*, Radom, Republic of Poland, December 27-28, с. 77-81, 2017.

[60] А. Журахівський, Н. Засідкович, та А. Яцейко. *Оптимізація режимів електроенергетичних систем. Навчальний посібник*. Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», Львів, 2009.

[61] О. Соловей, В. Розен, П. Плешков, та інші. *Основи ефективного використання електричної енергії в системах електроспоживання промислових підприємств. Навчальний посібник*. Міністерство освіти і науки України, Кіров. нац. техн. ун-т., Черкаси, 2015.

[62] Г. Хронусов. *Комплексы потребителей-регуляторов мощности на горнорудных предприятиях*. М.: 1989.

[63] *Законодавче та нормативно – правове стимулювання підвищення ефективності використання енергетичних ресурсів у провідних зарубіжних країнах*. Київ: Міністерство енергетики та вугільної промисловості України «НЕК «Укренерго». Науково-технічний центр електроенергетики, 2016. 85 с..

[64] Закон України Про ринок електричної енергії від 13.04.2017 №2019-VIII. URL: https://kodeksy.com.ua/pro_rinok_elektrichnoyi_energiyi.htm

[65] Европейская комиссия. *Сообщение комиссии - План комплексных стратегических энергетических технологий (SET): ускорение трансформации европейской энергетической системы*. Брюссель, 15.9.2015. 17 п. URL: https://setis/ec.europa.eu/system/files/integrated_set-plan/communication_set-plan_15_sept_2015.pdf.

[66] *Правила улаштування електроустановок*. Міненерговугілля України, Київ 2017.

[67] Р. Черняховский. Адаптация режимов работы электромеханических комплексов шахтного водоотлива к графикам энергосистемы в условиях переменных притоков. Автореф. дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук, Санкт-Петербург, 2003.

[68] *Правила безпеки у вугільних шахтах: НПАОП 10.0-1.01.10.* - К.: Державний комітет з промислової безпеки, охорони праці та гірничого нагляду, с. 432, 2010.

[69] *Правила технічної експлуатації вугільних шахт: СОУ 10.1-00185790-002-2005.* - К.: Мінвуглепром України, с. 353, 2006.

[70] Г. Онищенко и М. Юньков. *Электропривод турбомеханизмов*. М., Энергия, 1972.

[71] Ю. Разумний, А. Рухлов, та К. Родна. “Визначення ємності водозбірника головного водовідливу”, *Уголь Украины*, № 4, с. 31-32, 2010.

[72] Ю. Наннес, В. Недолужко, и С. Федор. “О требованиях по шахтному водоотливу новых ПТЭ и подготавливаемых ПБ”, *Уголь Украины*, № 5, с. 15-17, 2008.

[73] А. Ященко, В. Ковалев, и Э. Антонов. “Рациональный суточный график работы шахтной водоотливной установки”, *Уголь Украины*, № 7, с. 12-13, 2005.

[74] О. Сінчук, К. Будніков, та Р. Краснопольський. “Синергетична електроенергоефективна ситема керування електромеханічних комплексів вентиляторів головного провітрювання шахт”, *V Міжнародна науково-технічна конференція «Оптимальне керування електроустановками» 19-20 жовтня*, Вінницький національний технічний університет, с. 180, 2021.

[75] O. Sinchuk, R. Strzelecki, I. Sinchuk, A. Kupin, K. Budnikov, and T. Beridze. “Informational aspects at model of power consumption by main drainage facilities of iron-ore mining enterprises”, *Herald of Advanced Information Technology*, Vol.4 No.4, pp. 341 – 353, 2021.

[76] А. Гришко *Стационарные машины. – Том 2. Рудничные водоотливные, вентиляторные и пневматические установки: Учебник для вузов*. М.: Издательство «Горная книга», 2007.

[77] В. Гейер, и Г. Тимошенко. *Шахтные вентиляторные и водоотливные установки: Учебник для вузов*. М.: Недра, 1987.

[78] Г. Данильчук, С. Шевчук, и П. Василенко. *Автоматизация электропотребления водоотливных установок*. К.: Техника, 1981.

[79] А. Праховник, С. Шевчук, и В. Находов. “Управление электропотреблением водоотливных установок: Механизация и автоматизация управления”, *Вестник КПИ*, №3, с. 30-33, 1979.

[80] Ю. Разумний, А. Рухлов, К. Родна. “Умови ефективного регулювання режимів електроспоживання головним водовідливом шахт”, *РВК НГУ, Науковий вісник НГУ*, №1, 2010.

[81] Ю. Разумный, Е. Ильченко. “Проблемы использования водоотливных установок угольных шахт в качестве потребителей-регуляторов”, *РВК НГУ Наук.-техн. зб. Гірнича електромеханіка та автоматика*, Вип. 73, 2004.

[82] А. Мамедов. Разработка и обоснование мероприятий по повышению энергоэффективности комплексов шахтного водоотлива; На примере шахт ОАО "Севуралбокситруда". Автореф. дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук, Екатеринбург, 2004.

[83] Д. Боченков. Энергосберегающее регулирование режима работы главных водоотливных установок шахт и рудников средствами электропривода: автореф. дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук, Новочеркасск, 2010.

[84] Г.Пивняк, А. Бешта, А. Балахонцев и др. “Энергоэффективность комплекса шахтного водоотлива”, *Электротехнические комплексы и системы: Научно-технический журнал*, Киев: „Техніка”, №03(79), с. 394-396, 2011.

[85] Ю. Разумный, Н. Рухлова, и А. Рухлов. “Повышение энергоэффективности главной водоотливной установки угольной шахты”, *Науковий вестник НГУ Наук.-техн.*, № 5, с. 67-72, 2013.

[86] А. Рухлов, и Н. Рухлова. “Технологические условия работы главного водоотлива в режиме эффективного потребителя-регулятора”, *Уголь Украины*, № 12, с. 34-37, 2014.

[87] А. Яценко. “Пути повышения экономичности работы водоотливных комплексов”, *Уголь Украины*, № 4, с. 29-32, 2004.

[88] В. Бессараб, Р. Федюн. и В. Попов. “Управление шахтной водоотливной установкой в аварийных и аномальных режимах работы”, *Наукові праці ДонНТУ, серія "Обчислювальна техніка та автоматизація"*, Донецьк: РВК ДонНТУ, №106, с. 26-33, 2006.

[89] С. Толмачов, та О. Ильченко. “Оптимізація режимів роботи насосних установок головного водовідливу шахт за критерієм мінімуму вартості

електроенергії”, *Вісник Криворізького національного університету*, №44, с. 137-142, 2017.

[90] Б. Грядущий, Э. Антонов, и В. Стешенко. “Современное состояние и пути дальнейшего развития главных водоотливных и вентиляторных установок шахт”, *РВК ДонНТУ, Наукові праці ДонНТУ, серія "Гірничо-електромеханічна"*, №22 (195), с. 60-65, 2011.

[91] В. Щуцкий, А. Ляхомский, и Н. Ковальчук. “Определение перспективных нагрузок в условиях неполной информации”, *Колыма*, №4, с. 45-49, 1985,

[92] А. Ляхомский. Развитие теории и совершенствование методов повышения эффективности применения электроэнергии на горных предприятиях. Автореферат диссертаций доктора технических наук, МГИ, Москва, 1991.

[93] В. Винославский, А. Праховник, Ф. Клеппель, и У. Бутц. *Проектирование систем электроснабжения: Учебное пособие для вузов*. Киев, Вища школа, 1981.

[94] О. Кириленко, та С. Денисюк. “Сучасні тенденції побудови та керування режимами електроенергетичних мереж”, *Енергосбережение. Энергетика. Энергоаудит*, №9, том 2, с. 82-94, 2014,

[95] С. Волотковський. *Электрификация горных работ: Учебник для вузов*. Киев, Вища школа, 1980.

[96] I. Sinchuk, F. Karamanyts, Yu. Osadchuk, M. Baranovska, S. Boiko, Yu. Filipp, I. Kasatkina, A. Yalova, V. Fedotov, and T. Beridze. *Electric engineering of iron ore underground enterprises. Current status and prospects. Multi-authored monograph*, Edited by DSc., Prof. O. M. Sinchuk. Warsaw: iScience Sp. z o. o. - 2019.

[97] С. Випанасенко. *Системы энергоменеджменту вугільних шахт: Монографія*. Д.: Національний гірничий університет, 2008.

[98] Л. Плащанский, и В. Беляк. “Анализ технологических схем с целью рационального электроснабжения участков угольных шахт при напряжении 3 (3,3) кВ”, *Горный информационно-аналитический бюллетень МГГУ*, №6, с. 238-241, 2007.

[99] Б. Авилов-Карнаухов. *Электроэнергетические расчеты для угольных шахт*. Москва, Недра, 1956.

[100] Л. Полтава. “Пути рационализации подземного электроснабжения железорудных шахт Кривбасса”, *Сб. науч. тр. КГРИ*, №2, с. 3-10, 1948.

[101] Л. Живов, и Л. Полтава. “Определение мощности штрековых подстанций железорудных шахт”, *Горный журнал*, №6, с. 18-22, 1949.

[101] В. Заика. “Качество напряжения и оптимизация параметров электрических сетей добычных участков угольных шахт”, Автореферат диссертации канд. тех. наук, ДГИ, Днепропетровск, 1977.

[102] В. Волинець. Планування та моніторинг режиму електроспоживання вугільних шахт Львівсько-Волинського басейну». Автореф. дис. канд. техн. наук, Луцький нац. техн. ун-т, Луцьк, Україна, 2013.

[103] В. Розен, Л. Давиденко, та В. Волинець. “Оцінювання енергоефективності електроспоживання вугільних шахт”, *IV Міжнародна, наук.-техн. Конф. «Підвищення рівня ефективності енергоспоживання в електротехнічних пристроях і системах»*, Луцьк, ЛДТУ, с. 130-132, 2012.

[104] I. Sinchuk, K. Budnikov, and R. Krasnopolsky. Fundamental of integrating smart technologies for controlling power systems at iron ore underground mining enterprises. Warsaw: iScience Sp.z.o.o., 2021.

[105] А. Ляхомский. Развитие теории и совершенствование методов повышения электроэнергии на горных предприятиях. Автореферат дис. докт. техн. наук, МГИ, Москва, Россия, 1991.

[106] В. Калиниченко. *Определение нагрузки на шинах главной подземной подстанции шахты*, Бюллетень НТИ, 1980.

[107] T. Wu, S. Shieh, S. Jang, and C. Liu. “Optimal energy management integration for a petrochemical plant under considerations of uncertain power supplies”, *IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS*. №20 (3), pp. 1431-1439, 2005.

[108] H. Brand, J. Vosloo, and E. Mathews. “Automated energy efficiency project identification in the gold mining industry”, *PROCEEDINGS OF THE 13TH CONFERENCE ON THE INDUSTRIAL AND COMMERCIAL USE OF ENERGY*, IEEE, pp. 17-22, 2015.

[109] J. Menendoz, and J. Loredó. “Use of abandoned underground mines for construction of pumped-storage hydro power plants and their influence on the electrical system”, *Conference: XIV International Congress on Energy and Mineral Resources*. 2018.

[110] W. Nel. “The power of the worked-out mine: Conceptual designs for mine based pumped-storage hydroelectricity”, *MPES 2015 - Smart Innovation in Mining*. [https://www.researchgate.net/publication/283643054_ The Power_of_the_worked-out_mine_Conceptual_designs_for_mine-based_pumped-storage_hydroelectricity].

[111] H. Alvarez, G. Dominguez, A. Ordofiez, J. Menéndez, R. Alvarez, and J. Loredó. “Mine Water for the Generation and Storage of Renewable Energy: A Hybrid Hydro-Wind System”, *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 2021, 18, 6758. <https://doi.org/10.3390/ijerph181367589>.

[112] E. Pujades, P. Orban, S. Bodeux, P. Archambeau, S. Erpicum, and A. Dassargues. “Underground pumped storage hydropower plants using open pit mines: How do groundwater exchanges influence the efficiency?”, *Applied Energy*, Volume 190, pp. 135-146, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.12.093>

[113] А. Гуртовцев. “Гидроаккумулирующие электростанции”, *ЭЛЕКТРО* №1, с. 43-48, 2007.

[114] І. Сінчук. *Методологічні засади оцінювання електроефективності залізрудних підприємств: Монографія*. Кременчук, Україна: ПП Щербатих О.В., 2019.

[115] В Германии угольную шахту превратят в гидроаккумулирующую электростанцию. [<https://geektimes.ru/post/287320/>]

[116] М. Райкрофт. “Небольшие гидроаккумулирующие системы: новый партнер для возобновляемых источников энергии. Технологии и бизнес для развития 2017”, [Электронный ресурс]: [Веб-сайт]. – Электронные данные. – Режим доступа: <https://www.ee.co.za/article/small-pumped-water-storage-systems-new-partner-renewable-energy.html>

[117] B. Wu, M. Narimani. *High-power converters and AC drives*. Wiley-IEEE Press, 2017

[118] О. Сінчук, Ю. Філіпп, І. Сінчук, І. Бобриков, І. Касаткіна, та Р. Краснопольський. “Створення оборотних гідроагрегатів ГАЕС в структурі систем енергопостачання залізрудних підприємств”, *Scitntific Journal «ScienceRise»*, № 1(42), pp.29-36, 2018.

[119] M. Biloshytskyi, H. Tatarchenko, N. Biloshytska, and P. Uvarov. “Operational lifetime increase of the pumping equipment when pumping-out contaminated groundwater”, *Mining of Mineral Deposits*, 15(1), pp. 42-49, 2021.

[120] J. Pearson. “Decomposition, coordination and multilevel system”, *IEEE Trans. Syst. Sei and Cybemet*, Vol. 2, 1966.

[121] О. Сінчук, Ю. Філіпп, І. Сінчук, А. Михайленко, К. Будніков, та Р. Краснопольський. “До проблеми створення синергетичних електроенергетичних комплексів з піковими ГАЕС на основі водовідливних систем залізрудних шахт”, *Гідроенергетика України*, № 3-4, с. 83-89, 2021.

[122] А.Ф. Жарнін, С.П. Денисюк, та В.А. Попов. *Системи електропостачання з джерелами розподіленої генерації*, НВП «Видавництво «Наукова думка» НАН України», Київ, 2017.

[123] Л. Мелентьев. *Оптимизация развития и управления больших систем энергетики, Учеб. Пособие*. М. Высш.Шк., 1982.

[124] О. Эгоршин, та Л. Малярець. *Математичне програмування. Підручник*. Ч., ВД «ИНЖЕК», 2006.

[125] Н. Лавріненко С. Латинін, В. Фортуна, та О. Бескровний. *Основи економіко-математичного моделювання. Навч. посіб.*, Львів, Магнолія 2006, 2010.

[126] Г. Фихтенгольц. *Основы математического анализа*. М., Наука, 1969.

[127] О. Sinchuk, I. Kozakevich. “Research of regenerative braking of traction permanent magnet synchronous motors”, *Proc. of the Intern. Conf. on Modern Electrical and Energy Systems*, pp. 92-95, 2017

[128] В. Розен, та Л. Давиденко. “Нейромережеве моделювання електроспоживання підприємств вугільної галузі”, *Вісник КДУ імені Михайла Остроградського*, Випуск №3, с. 156-161, 2010.

[129] О. Сінчук, І. Сінчук, І. Козакевич, В. Федотов, В. Серебренников, Н. Лохман, Т. Берідзе, С. Бойко, А. Пироженко, та А. Ялова. “Разработка функциональной модели управления уровнями потребления электроэнергии подземными железорудными предприятиями”, *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*, №6, с. 20-27, 2018,

[130] С. Айвазян, В. Мхитарян. *Прикладная статистика и основы эконометрии*. Москва: ЮНИТИ, 1998.

[131] Т. Берідзе. *Статистичний моніторинг в системі стратегічного управління підприємством. Монографія*. Кременчук, ПП Щербатих О.В., Україна, 2016.

[132] Інтернет ресурс, спосіб доступу: <https://www.wonderware.com.ua/solutions/mining-minerals-and-metals/01.06.2019>.

[133] Інтернет ресурс, спосіб доступу: <https://epravda.com.ua/27.05.2019>.

[134] А. Леонинков. *Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH*. СПб., БХВ-С. Петербург, 2003.

[135] Є. Бодянський, Є. Кученренко, О. Михальов, В. Філатов, та М. Гасик. *Методи обчислювального інтелекту в системах керування технологічними процесами феросплавного виробництва*. Дніпропетровськ, НМетАУ, 2011.

[136] М. Мееров, А. Ахметзянов, Я. Берщанский и др. *Многосвязные системы управления*. М., Наука, 1990.

[137] А. Молчанов. *Моделирование и проектирование сложных систем*. К., Выща школа, 1988.

[138] Р. Дорф, и Р. Бишоп. *Современные системы управления*. М., Лаборатория Базовых Знаний, 2004.

[139] Интернет ресурс, способ доступа: <https://dnepr.com.ua/tariffs-business/01.06.2019>.

[140] L. Scekcic, S. Mujovic, and V. Radulovic. “Pumped Hydroelectric Energy Storage as a Facilitator of Renewable Energy in Liberalized Electricity Market”, *Energies*, MDPI AG, Vol. 13, №22, p. 6076, 2020/

[141] M. Al-Addous, S. Al Hmidan, M. Jaradat, E. Alasis, and N. Barbana. “Potential and Feasibility Study of Hybrid Wind-Hydroelectric Power System with Water-Pumping Storage: Jordan as a Case Study”, *Applied Sciences*, №10, p. 3332, 2020. <https://doi.org/10.3390/app10093332>

[142] Optimal System Type Plot. Homer Energy: веб-сайт. URL: <https://www.homerenergy.com/products/pro/docs/latest/optimal-system-type-plot.html>.