

Криворізький національний університет
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

БАРАНОВСЬКИЙ ВЛАДИСЛАВ ДМИТРОВИЧ

УДК 621.313-57

ДИСЕРТАЦІЯ

**НЕЧІТКЕ КЕРУВАННЯ РЕЖИМАМИ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ
ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИМИ СИСТЕМАМИ ГОЛОВНИХ
ВОДОВІДЛИВНИХ КОМПЛЕКСІВ 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.

В. Д. Барановський

Науковий керівник:

Сінчук Олег Миколайович,
доктор технічних наук, професор

АНОТАЦІЯ

Барановський В.Д. Нечітке керування режимами електроспоживання електромеханічними системами головних водовідливних комплексів залізорудних шахт. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» галузі знань 14 «Електрична інженерія». – Криворізький національний університет, Кривий Ріг, 2024.

На початок 2022 року з 55 % загальнопромислового обсягу споживання електричної енергії в Україні на металургійне виробництво витрачалось близько 35 %, а на їх базові сировинні партнери – гірничовидобувні – біля 20 %. Ці цифри віддзеркалюють факт значної енергоємності підприємств галузі, що аналізується. Цей факт негативно впливає на загальний стан, перш за все, економіки самих 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 %.

Базоутворюючою складовою рівня енергоефективності (енергоємності) видобутку корисних копалин взагалі, а залізної руди, зокрема, виступає технологія їх видобутку.

Як факт, слід констатувати, що існуючі сторіччями технології видобутку залізної руди, до сьогодні, в позитивний бік практично не змінились. Як встановлено в ході досліджень, базовий варіант збільшення енергоефективності підземних підприємств шляхом зменшення витрат ЕЕ на усталені обсяги видобутку ЗР в значній мірі себе вичерпав. Необхідні нові спрямування пошуку шляхів вирішення проблеми, що аналізується.

Превентивний аналіз нових, нетрадиційного спрямування, заходів із підвищення енергоефективності гірничодобувних виробництв спонукав автора до внесення пропозиції щодо коригування існуючого канонічного формату поняття енергоефективності.

Доцільність такого оновленого формату підкріплюється значними коливаннями рівнів споживання електроенергії в часі і, що особливо, в годинах доби. Як факт, встановлено, що стохастичність поточних параметрів в електроенергетиці даних видів підприємств, окрім природнього фактору коливань згідно зі зміною обсягів видобутку ЗР, у відповідності до тієї чи іншої робочої зміни, в певній мірі створюється штучно енергетичними службами підприємств з метою зменшення рівнів сплати за спожиту електроенергію згідно існуючих «плаваючих» погодинних тарифів протягом доби.

У свою чергу, аналіз розкидів вищезгаданих коливань рівнів споживання ЕЕ свідчить про домінуючу – системоутворюючу роль у цьому впливі режимів роботи базових енергоємних споживачів електроенергії даних підприємств і, перш за все, найбільш енергоємних із них – головних водовідливних комплексів, котрі відводять підземні води з шахт на поверхню і споживають більше 30 % від усього обсягу електричної енергії, що використовується всіма електротехнічними та електромеханічними системами та комплексами залізничних шахт.

Для формування тактики досліджень оцінено ефективність функціонування електромеханічних систем насосних агрегатів – модулів ГВК як в індивідуальному, так і в груповому варіантах їх роботи. Окреслено стан та можливості підвищення рівня використання їх енергетичного потенціалу.

Базуючись на дослідницькому матеріалі, стратегічно визначено необхідність розбудови двоєдиного алгоритму керування процесом функціонування ГВК:

– керування електроенергетичними та електромеханічними параметрами роботи електромеханічних систем насосних агрегатів на основі регульованого асинхронного електроприводу з базуванням у межах енергоефективних режимів функціонування привідних двигунів як в індивідуальному, так і груповому варіантах;

– керування режимами роботи водовідливного комплексу в функції технологічних параметрів його функціонування та «плаваючих» погодинних у добі тарифів за спожиту електроенергію.

Логістика кінцевого дослідження спрямована на розбудову відповідної системи керування комплексом ГВК і з перспективою залучення до управлінських дій штучного інтелекту. Саме наповненню необхідним змістом процесу створення такої СК і відповідає зміст діючого наукового пошуку.

Мета досліджень – підвищення електроенергоефективності головних водовідливних комплексів залізородних шахт у напрямку збільшення рівня використання енергетичного потенціалу цього виду стаціонарних установок, шляхом розробки теоретичних аспектів і практичних рекомендацій для розбудови системи багатокритеріального нечіткого керування режимами функціонування електромеханічних систем насосних агрегатів.

Результати дослідження містять наступну **наукову новизну**:

1. На основі системного підходу, з погляду на сучасний період електрифікації гірничорудного виробництва, котрий характеризується значним підвищенням ролі показників техніко-економічної ефективності використання електроенергії у процесі видобутку залізної руди, дослідження сутності енергоємності видобутку, дозволило скоригувати, в новому баченні поточного стану, системоутворюючі енергоємні складові споживання електричної енергії енергоємними споживачами підземних залізородних підприємств як процесу з оцінюванням характеру його протікання, в тому числі найбільш впливового на цей показник – головних водовідливних комплексів.

2. Вперше для розширення кордонів канонічних визначень електроенергоефективності, в контексті сучасних бачень відповідних заходів, як гірничодобувних підприємств у цілому, так і окремих видів енергоємних споживачів даних підприємств, зокрема, запропоновано нову концепцію визначення цього показника, котра відрізняється від попередньої логікою оцінювання впливу електроенергетичної складової на рівень собівартості –

базового економічного показника функціонування гірничих підприємств з видобутку конкретного виду корисних копалин.

3. Досліджено новий ефект процесу водовідведення як стохастичного процесу, що дозволило, шляхом використання статистичного матеріалу зі швидкості накопичення води в підземних виробках, побудувати синтезовану математичну модель, котра дає можливість визначити такі характеристики процесу водовідливу як середні та дисперсії, обсяги накопичення води на підземних горизонтах і відповідних енергозатрат на водовідведення із заданих глибин конкретних шахт за визначений поточний період часу. Здобуті результати дозволяють характеризувати водовідлив не тільки за середніми величинами, але й за дисперсіями, тобто, за їхнім розкидом, що є системоутворюючим показником для формування системи керування електроенергетикою всього водовідливного комплексу.

4. Вперше для розбудови системи керування головними водовідливними комплексами залізорудних шахт обґрунтовано та систематизовано електроенергетичні параметри функціонування електромеханічних систем з доведення залежності їх впливу на режими роботи насосних агрегатів для формування схеми алгоритму як підсистеми керування даним комплексом, у варіанті переступної до узагальненої структури керуючої системи.

5. Розроблено авторський варіант експертної системи керування споживанням електричної енергії з можливістю застосування варіанта автоматизованого керування головними водовідливними комплексами залізорудних шахт із вхідними параметрами – водоприплив і погодинна вартість електроенергії та вихідним – загальна потужність насосів, на базі нечіткого логічного виводу Мамдані, що використовує гладкі функції приналежності гаусової та сигмоїдної форм.

Практичне значення отриманих результатів полягає у наступному:

– розроблено та запропоновано як варіант для подальшого використання методик оцінювання рівнів споживання електричної енергії енергоємними

споживачами залізорудних шахт у цілому та базових у цьому комплексі – головних водовідливних комплексів, зокрема;

– запропоновано синтезовану модель, яка дозволяє визначати такі стохастичні характеристики процесу водовідливу, як середні і дисперсії потужності енерговитрат на водовідлив, обсягів накопичення води на підземному горизонті шахти, і енерговитрат на водовідлив із заданої глибини за визначений час;

– отримані результати дозволяють характеризувати процес водовідливу не тільки за середніми величинами, але й за дисперсіями, тобто за їхнім розкидом;

– форматизовано двоєдиний алгоритм функціонування системи керування водовідведенням залізорудних шахт шляхом реалізації максимально досяжного електроенергетичного потенціалу функціональних електромеханічних параметрів агрегатів насосних модулів з асинхронними двигунами та у функції обсягів водоприпливу і «плаваючих» у годинах доби тарифів на електроенергію, що постачається;

– одержані в процесі наукового пошуку результати впроваджено шляхом передачі відповідних дослідницьких матеріалів для їх практичної реалізації спеціалізованим підприємствам з проектування та монтажу систем електропостачання гірничорудних виробництв: НВО «Ракурс» (м. Кривий Ріг) та ТОВ «Рудомайн» (м. Кривий Ріг), що підтверджено відповідними актами про впровадження;

– результати роботи використовуються у Криворізькому національному університеті на кафедрі електричної інженерії для підготовки фахівців за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», що підтверджено актом про впровадження.

Структура дисертаційної роботи. Дисертаційна робота має два томи. **Том 1:** вступ, 4 розділи, загальні висновки, список використаних джерел.

У **Вступі** сформульовано актуальність дослідження, його мету, наукові завдання, результати дослідження, що містять наукову новизну.

У **Розділі 1** на основі діагностування стану електроенергетичного комплексу з оцінюванням рейтингу споживання електричної енергії приймачами залізорудних шахт підтверджено, що головні водовідливні комплекси є енергоємними споживачами електричної енергії, а підвищення їх електроенергоєфективності є актуальною проблемою. Акцентовано, що канонічні формули з визначення рівнів електроенергоєфективності видів шахт, що аналізуються, як і їх окремих споживачів, потребують нового формату в умовах сучасних енергоорієнтованих спрямувань.

У **Розділі 2** проведено математичне моделювання режимів постачання-споживання електричної енергії головним водовідливним комплексом залізорудних шахт як стохастичного процесу та визначено комплекс енергетичних характеристик, які пов'язані з фактом випадковості: швидкість та обсяги накопичення води на підземному горизонті шахти, енерговитрати на водовідведення із заданого підземного горизонту шахти за визначений час.

У **Розділі 3**, враховуючи постійну мінливість параметрів режимів функціонування головних водовідливних комплексів, розглянуто впровадження системи автоматизованого управління з використанням системи ПЧ-АД та врахуванням сигналів датчиків стану, а також прийняття управлінських рішень по включенню певної кількості насосів і режимів їх роботи.

У **Розділі 4** запропоновано для впровадження систему експертного керування енергоспоживанням шахтними водовідливними комплексами на базі алгоритму нечіткого логічного виводу Мамдані; вищу якість керування продемонструвала система з базою нечітких правил типу кон'юнкція у порівнянні із системою нечіткого логічного виводу з кусково-лінійними функціями з подальшим удосконаленням нечітких систем шляхом введення додаткового обмеження на рівень потужності насосних агрегатів, котрі працюють одночасно, під час фазифікації відповідної лінгвістичної змінної.

У **Заключних висновках** викладено квінтесенцію отриманих результатів наукового пошуку та певні рекомендації до їх практичного

використання в практиці розробки та проектування енергоефективних систем керування рівнями споживання електроенергії енергоємними споживачами в структурі загальної системи керування електроенергетичними потоками підземних залізрудних підприємств.

Том 2: Додатки. Наведено аналіз енергоємності гірничорудних підприємств, типові архітектури водовідведення та експериментальні статистичні дані по рівнях споживання електроенергії діючих залізрудних шахт України, акти впровадження результатів досліджень.

Ключові слова: енергосистема, електроенергоефективність, водовідливний комплекс, навантаження, обробка даних, система керування, математична модель, моделювання.

ABSTRACT

Baranovskyi V.D. Fuzzy control of power consumption modes by electromechanical systems for main drainage facilities of iron ore underground mines. – Qualifying research work on the rights of a manuscript.

Thesis for the Doctor of Philosophy degree. Specialty 141 – Electric Power Engineering, Electrical Engineering and Electrical Mechanics. Study Area 14 – Electrical Engineering. – Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, 2024.

As of early 2022, metallurgical production accounts for nearly 35 % of 55 % of Ukraine's industrial power consumption, while mining, its main raw material partner, accounts for about 20 %. The figures reflect the fact that enterprises in the analyzed industry are very energy intensive. This fact adversely affects the overall economy of mining enterprises themselves, and thus their competitiveness in the global raw materials market, where Ukraine occupies a respectable position, this in turn allowing the country to replenish its foreign exchange reserves by 60-70 % annually.

A fundamental component of energy efficiency (energy intensity) of the mining industry in general, and iron ore mining in particular, is the mining technology, which varies with the type of mineral.

In fact, iron ore mining technologies that have existed for centuries have not changed for the better. As established in the course of the research, the basic option of increasing the energy efficiency of underground mining enterprises by reducing energy consumption relative to established iron ore production has largely exhausted itself. New directions are needed to find solutions to the problem under analysis.

A preventive analysis of new, unconventional measures to improve the energy efficiency of mining operations prompts the author to propose adjustments to the existing canonical format of the concept of energy efficiency.

The expediency of this updated format is supported by significant fluctuations in power consumption levels over time, especially in hours of the day. It is established that stochasticity of current parameters in the power industry of these types of enterprises, in addition to natural fluctuations in accordance with changes

in the volume of mineral resources production during a particular work shift, is to some extent artificially created by energy services of enterprises in order to reduce power consumption payments under variable ("floating") daily power tariffs.

Furthermore, analysis of the above-mentioned fluctuations in power consumption levels indicates that the operating modes of basic energy-intensive power consumers of these enterprises play a dominant system-forming role in this impact, especially main drainage facilities, which are the most energy-intensive of them all. The latter drain groundwater from underground mines to the surface and consume more than 30% of the total amount of power used by all electrical and electromechanical systems and facilities of iron ore underground mines.

To formulate the research tactics, the functioning efficiency of electromechanical systems of pumping units – main drainage facilities' modules – is evaluated in both individual and group operation variants. The current state and potential for improving the level of utilization of their energy efficiency are outlined.

Based on the research data, the necessity of developing a two-pronged algorithm to control the functioning of the main drainage facilities is strategically determined, which includes:

- controlling electric power and electromechanical parameters of electromechanical systems of pumping units based on a regulated asynchronous electric drive using energy-efficient operation modes of drive motors in both individual and group variants;

- controlling operating modes of drainage facilities as a function of technological parameters of their operation and variable ("floating") hourly tariffs for the consumed power.

The logistics of the final research are aimed at developing an appropriate control system for main drainage facilities with the prospect of involving artificial intelligence in control actions. The content of the current scientific research corresponds to filling in the necessary details for the process of creating such a control system.

The aim of the research is to improve the energy efficiency of main drainage facilities of iron ore underground mines and to increase the level of utilization of the energy potential of this type of stationary equipment by developing theoretical aspects and practical recommendations for building a multi-criteria fuzzy control system for operating modes of electromechanical systems of pumping units.

The research results contain the following **scientific novelty**:

1. Based on a systematic approach and in view of the current period of electrification of mining production, which is characterized by a significant increase in the role of technical and economic efficiency indicators of power application in iron ore mining, studying the essence of energy intensity of mining allows us to adjust, in a new vision of the current state, system-forming energy-intensive components of power consumption by energy-intensive consumers of underground iron ore mining enterprises as a process involving assessment of the nature of its flow, including the most influential component, main drainage facilities.

2. For the first time, in the context of modern visions of relevant measures, both for mining enterprises in general and for certain types of energy-intensive consumers of these enterprises in particular, a new concept for determining this indicator is proposed to expand the boundaries of canonical definitions of energy efficiency. It differs from the previous logic of assessing the impact of the power component on the cost level, which is the basic economic indicator of the functioning of enterprises mining a particular type of minerals.

3. A new effect of drainage as a stochastic process is investigated and statistical data on the rate of water accumulation in underground workings can be used to build a comprehensive mathematical model to determine such characteristics of the drainage process as the mean and variances, the amount of water accumulated in underground levels and the corresponding power costs for drainage from particular depths of specific underground mines over a particular period of time. The obtained results enable characterizing the drainage process not only by average values but also by variances, i.e. by their scatter, which is a system-forming indicator for forming the power control system of the entire drainage complex.

4. For the first time, in order to develop a control system for main drainage facilities of iron ore underground mines, power parameters of the functioning of electromechanical systems are substantiated and systematized to prove the dependence of their influence on the operating modes of pumping units and to form an algorithm scheme as a subsystem for controlling this complex in the version of the generalized control system structure.

5. The author's version of an expert system for controlling power consumption with possible application of the automated control of main drainage facilities of iron ore underground mines based on input parameters (water inflow and hourly power cost) and output parameters (total pump power, based on fuzzy Mamdani inference using smooth membership functions of Gaussian and sigmoidal forms) is developed.

The practical significance of the results is as follows:

- a methodology for assessing the levels of power consumption by energy-intensive consumers of iron ore underground mines in general and main drainage facilities in particular is developed and proposed as an option for further use;
- a synthesized model is proposed to determine stochastic characteristics of the drainage process, such as the mean and variance of power consumption for drainage, the amount of water accumulated in the underground mine level, and the power consumed for drainage from a specific depth over a specific time;
- the results obtained allow characterizing the drainage process not only by average values, but also by variances, i.e. by their scatter;
- a two-part algorithm for the functioning of the iron ore underground mine drainage control system is formatted by realizing the maximum achievable power potential of functional electromechanical parameters of the units of pumping modules with asynchronous motors and as a function of water inflow and "floating" power costs in hours of the day;
- the research results are implemented at specialized mining enterprises (Rakurs and Rudomain LLC (Kryvyi Rih)) to design and install power supply systems for mining operations which is confirmed by relevant implementation acts;

– the results obtained are used at the Electrical Engineering Department of Kryvyi Rih National University to train specialists in Specialty 141 Electric Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics, which is confirmed by the implementation act.

The thesis structure includes two volumes. **Volume 1** comprises introduction, four chapters, general conclusions, and references.

The Introduction formulates the relevance of the research, its aim, scientific objectives, and research results containing scientific novelty.

In **Section 1**, based on the diagnosis of the power complex state and the rating assessment of power consumption by iron ore underground mine receivers, it is confirmed that main drainage facilities are energy-intensive power consumers, and that improving their energy efficiency is an urgent problem. It is emphasized that the canonical formulas for determining the level of energy efficiency of the analyzed types of underground mines and their individual consumers, require a new format in the context of modern energy-oriented trends.

Section 2 mathematically models the modes of power supply and consumption by the main drainage facilities of iron ore underground mines as a stochastic process and determines a set of energy characteristics associated with the fact of randomness, namely the rate and the amount of water accumulated in the underground level of the underground mine, the amount of water consumption for drainage from a given underground level of the underground mine for a given time.

In **Section 3**, taking into account constant variability of operating mode parameters of main drainage facilities, the implementation of an automated control system using the FC-AM system and considering the signals of state sensors, as well as making control decisions to switch on a certain number of pumps and their operating modes is considered.

Section 4 proposes to introduce a system for expert control of power consumption by main drainage facilities based on the Mamdani fuzzy inference algorithm. A higher quality of control is demonstrated by a system based on fuzzy rules of the conjunction type compared to a fuzzy logic inference system with

piecewise linear functions, with further improvement of fuzzy systems by introducing an additional restriction on the power level of pumping units operating simultaneously during the fuzzification of the corresponding linguistic variable.

The Conclusions summarize the quintessence of the research results and provide certain recommendations for their practical application in developing and designing energy-efficient systems to control power consumption by energy-intensive consumers in the structure of the overall system for controlling power flows at underground iron ore mining enterprises.

Volume 2 includes appendices. Energy intensity of mining enterprises, typical drainage architectures and experimental statistics on the levels of power consumption of operating iron ore underground mines in Ukraine, as well as acts of implementation of research results are analyzed.

Keywords: power system, energy efficiency, drainage facility, loading, data handling, control system, mathematical model, modeling.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗДОБУВАЧА
ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Монографія

[1] Starting positions to improve energy efficiency of main water drainage facilities of iron ore underground mines / Monograph / V. Baranovskyi. Supervised by Doctor of Sciences (Engineering), Professor Sinchuk O. Warsaw: iScience Sp. z.o.o., 2023. ISBN 978-83-66216-83-9.

Статті в міжнародних виданнях, які внесено до міжнародної науково-метричної бази даних Scopus та Web of Science

[2] V. Baranovskyi, O. Sinchuk, R. Strzelecki, I. Sinchuk, T. Beridze, V. Fedotov, and K. Budnikov. Mathematical model to assess energy consumption using water inflow-drainage system of iron-ore mines in terms of a stochastic. *Mining of Mineral Deposits*, Volume 16, no. 4, 2022, pp. 19-28, <https://doi.org/10.33271/mining16.04.019> (Scopus);

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

Статті у фахових наукових виданнях України

[4] V. Baranovskyi, K. Budnikov, I. Sinchuk, A. Somochkyn, S. Somochkyna, 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: 10.15276/hait.04.2022.4 (Фахове видання категорія Б);

[5] Барановський В. Д., Будніков К. В., Сінчук О. М., Михайленко О. Ю., Купін А. І., Пересунько І. І. Нечітка система керування процесами «енергопостачання-енергоспоживання» в енергосистемах залізородних шахт з

розподіленою генерацією. *Гірничий вісник*, Вип. 110, 2022, с. 46-53. (Фахове видання категорія Б);

[6] Барановський В. Д., Коломіц Г. В., Барановська М. Л., Власенко В. А., Чорний О. П., Артеменко А. М., Батирбек А. Е. Дослідження потенціалу енергозбереження шахтної водовідливної установки засобами регульованого електроприводу. *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. Вип. 1/2022 (57). с. 16–24, DOI: 10.30929/2072-2052.2022.1.57.16-24. (Фахове видання категорія Б);

[7] Baranovskyi V., Budnikov K., Sinchuk I., Beridze T., Fedotov V., Peresunko I. 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);

[8] Барановський В., Сінчук О., Берідзе Т., Пересунько І., Сінчук І., Артеменко А. Засадничі імперактиви моніторингу енергоорієнтованих режимів споживання електричної енергії на залізрудних підприємствах. *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. 2022. № 2. с. 24–30, DOI: 10.30929/2072-2052.2022.2.58.24-30 (Фахове видання категорія Б).

Тези доповідей на міжнародних наукових конференціях

[9] Барановський В.Д., Будніков К.В., 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;

[10] V. Baranovskyi, O. Chorny, V. Busher, V. Kuznetsov, P. Hubskeyi, O. Lelikova, "Improving the Energy Efficiency of a Mine Drainage Installation by Means of an Industrial Electric Drive", 2022 IEEE 3rd KhPI Week on Advanced Technology (KhPI Week), October 03-07, 2022, pp. 541–545.

[11] Baranovskyi, V., Sinchuk, O., Beridze, T., Sinchuk, I., (2022). Simulation Version of Evaluating Corporate Power Consumption by Consumers of Iron Ore Mines Using Nonlinear Optimization Means. 2022 IEEE 4th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES). October 20-22, 2022, Kremenchuk, Ukraine, <https://doi.org/10.1109/mees58014.2022.10005744>;

[12] V. Baranovskyi, I. Sinchuk, O. Mykhailenko, A. Kupin, O. Ilchenko, K. Budnikov "Developing the algorithm for the smart control system of distributed power generation of water drainage complexes at iron ore underground mines," 2022 IEEE 8th International Conference on Energy Smart Systems (ESS), 2022, pp. 116-122, DOI: 10.1109/ESS57819.2022.9969263;

[13] V. Baranovskyi, O. Sinchuk, A. Somochkyn, I. Sinchuk, V. Fedotov, S. Somochkyna, "Simulation-based investigations to assess directions of improving energy efficiency of main water drainage complexes at underground mines", "Problems of Energy Management System – PEMS", VIII Міжнародна конференція «Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку – PEMS'22», Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», листопад 15-17, 2022;

[14] Барановський В.Д., Сінчук О.М., Берідзе Т.М. Системоутворюючі складові оцінювання рівнів коливань спожитої залізородними підприємствами електроенергії. Міжнародна науково-технічна конференція Розвиток промисловості та суспільства. Криворізький національний університет. Кривий Ріг, 2023. С. 81;

[15] Baranovskyi V., Mykhailenko O., Shchokin V., Karabut N., Kolomits H. Power consumption control of multi-pump systems of the main water drainage in underground mines based on the Mamdani fuzzy inference system. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (ICSE 2023). vol. 1254. Article 012046, DOI: 10.1088/1755-1315/1254/1/012046.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	22
ВСТУП.....	23
РОЗДІЛ 1. ФОРМАТИЗАЦІЯ СИСТЕМОУТВОРЮЮЧИХ СКЛАДОВИХ ПРОЦЕСУ ОЦІНЮВАННЯ РІВНІВ СПОЖИВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ НА ПІДЗЕМНИХ ЗАЛІЗОРУДНИХ ПІДПРИЄМСТВАХ.....	36
1.1 Вхідні зауваження до стану і напрямків пошуку сучасних спрямувань із підвищення електроефективності функціонування залізорудних шахт.....	36
1.2 Оцінювання і визначення методичних підходів щодо формування техніко-аналітичних показників електроенергоефективності підземних залізорудних підприємств.....	40
1.2.1 Оцінювання рівнів електроенергоефективності та розробка пропозицій щодо розширення меж канонічних визначень цього показника в умовах сучасних гірничодобувних підприємств.....	40
1.2.2 Розробка формату техніко-економічних показників електроенергоефективності залізорудних шахт.....	42
1.3 Діагностування стану споживання електроенергії приймачами залізорудних шахт.....	45
1.4 Режими і специфіка процесу споживання електричної енергії в умовах підземних залізорудних підприємств	52
1.5 Огляд і коректний аналіз відомих наукових досліджень у сфері підвищення енергоефективності головних водовідливних установок шахт.....	61
1.6 Визначення мети і форматизація наукових задач досліджень.....	66
1.7 Висновки до розділу 1.....	69

РОЗДІЛ 2. МОНІТОРИНГ ДИНАМІКИ СПОЖИВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ ГОЛОВНИМИ ВОДОВІДЛИВНИМИ КОМПЛЕКСАМИ ЗАЛІЗОРУДНИХ ШАХТ.....	72
2.1 Загальні методичні принципи дослідження електроенергетичного комплексу електропостачання-електроспоживання як динамічного процесу в умовах залізорудних шахт	72
2.2 Моніторинг споживання електроенергії в умовах вітчизняних залізорудних шахт як процесу.....	77
2.3 Формат практичного варіанту побудови стохастичної моделі процесу водовідведення залізорудних шахт.....	87
2.4 Висновки до розділу 2.....	106
РОЗДІЛ 3. ВИЗНАЧЕННЯ БАЗОВИХ СКЛАДОВИХ ФОРМАЦІЇ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОГО КЕРУВАННЯ ПАРАМЕТРАМИ ФУНКЦІОНУВАННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ ГОЛОВНИХ ВОДОВІДЛИВНИХ КОМПЛЕКСІВ ЗАЛІЗОРУДНИХ ШАХТ.....	108
3.1 Вступні посилання на бачення ефективності застосування технічних засобів підвищення енергоефективності головних водовідливних комплексів	108
3.2 Дослідження стартового варіанту розбудови структури енергоефективного керування режимами функціонування водовідливних комплексів.....	110
3.3 Розробка імітаційної моделі для дослідження параметрів і режимів роботи головних водовідливних комплексів	112
3.4 Дослідження функціональної динаміки електромеханічних систем насосних агрегатів головних водовідливних комплексів залізорудної шахти.....	118

3.5 Оцінювання впливу втрат електроенергії в привідних двигунах насосних агрегатів на енергобаланс головних водовідливних комплексів.....	124
3.6 Оцінювання рівнів меж енергоефективного керування потужністю, споживаною насосними агрегатами за допомогою перетворювачів частоти напруги живлення привідних двигунів.....	129
3.7 Оцінювання рівнів енергоефективності електромеханічних систем водяних насосних агрегатів головних водовідливів у процесі їх вмикання-вимикання	130
3.8 Обґрунтування базової структури формату стартового варіанта системи керування режимами роботи головного водовідливного комплексу залізорудної шахти.....	134
3.9 Висновки до розділу 3.....	139
РОЗДІЛ 4. ФОРМАТ РОЗБУДОВИ АЛГОРИТМУ ТА АРХІТЕКТУРИ КЕРУВАННЯ РЕЖИМАМИ ФУНКЦІОНУВАННЯ ГОЛОВНИХ ВОДОВІДЛИВНИХ КОМПЛЕКСІВ ШАХТ НА БАЗІ НЕЧІТКОГО ЛОГІЧНОГО ВИВОДУ МАМДАНІ.....	142
4.1 Головний водовідливний комплекс залізорудної шахти – об’єкт нечіткого керування.....	142
4.2 Обґрунтування методу нечіткого керування споживанням електроенергії головним водовідливним комплексом залізорудної шахти.....	145
4.3 Розробка інтелектуальної експертної системи керування споживанням електроенергії головним водовідливним комплексом залізорудної шахти.....	145
4.3.1 Фазифікація лінгвістичних змінних нечіткої системи керування	145
4.3.2 Синтез бази правил системи нечіткого виводу.....	155

4.4 Імітаційне моделювання процесу функціонування експертної системи керування споживанням електроенергії головними водовідливними комплексами	159
4.5 Висновки до розділу 4.....	166
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	168
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ.....	173

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ВВП	– внутрішній валовий продукт;
ЗР	– залізна руда;
ЕЕ	– електрична енергія;
ГЗФ	– гірничо-збагачувальна фабрика;
ГЗК	– гірничо-збагачувальний комбінат;
СЕП	– система електропостачання;
ГВК	– головний водовідливний комплекс;
ГВУ	– головні водовідливні установки;
АЕ	– активний елемент;
ПЕР	– паливно-енергетичні ресурси;
ПЕК	– паливно-енергетичний комплекс;
СкПУ	– скіпові підйомні установки;
ДСФ	– дробильно-сортувальна фабрика;
ВУ	– вентиляційні установки;
ЕМС	– електромеханічні системи;
ЕС	– електроспоживання;
АД	– асинхронний двигун;
ПЧ	– перетворювач частоти напруги живлення приймачів електроенергії;
СК	– система керування;
АСК	– автоматизована система керування;
ГАЕС	– гідроакумлююча електростанція.

ВСТУП

Ризики, пов'язані з проблематикою й оцінюванням реалій стану та перспектив позитивного розвитку вітчизняної енергетики, визначають підвищений інтерес до тих чи інших варіантів перспектив майбутнього цієї системоутворюючої для України галузі [1-4].

Енергетична безпека натепер є наріжним каменем політики не тільки України, а і багатьох країн світу, хоча наша держава в цьому аспекті перебуває у вкрай скрутному становищі, яке близьке до драматики [5, 6].

Доречно зазначити, що до 2030 р., за прогнозами Міністерства палива і енергетики України, у країні планується скорочення споживання енергоресурсів на 12 %, у тому числі в металургії, до якої традиційно відноситься і залізородна підгалузь – на 30 % [4]. На противагу цим «планам» зазначимо, що на період до 2019 року такої тенденції у рівнях споживання ЕЕ в дійсності не спостерігалось. А якщо зазирнути ще на один рік назад, то побачимо, що рівень споживання ЕЕ в 2018 р. у порівнянні з 2013 р. в Україні взагалі не скоротився, у тому числі в металургійній і в гірничорудній сферах стабільно застиг на позначці близькій до 24,5 % [6]. І це при тому, що ряд підприємств вищезгаданої галузі в цей період, з відомих причин, хоча і тимчасово, та все ж зникли з енергетичної мапи споживачів ЕЕ держави.

Актуальність дослідження. Стратегія розвитку України, як і стратегія її енергетики, в комплексі спрямувань, передбачає перш за все зменшення енергоємності ВВП [6]. У свою чергу, «дорожня карта» цього спрямування пролягає через вирішення проблеми зменшення енергоємності продукції, яка виробляється, перш за все, енергоємними підприємствами ряду галузей промисловості. Вагомою складовою серед плеяди енергоємних підприємств держави є підприємства металургійної галузі та її сировинної складової – гірничорудної [7-12]. Одним із локальних і досить ефективних спрямувань у цьому може стати використання, поки що далеко не використаного, потенціалу власних енергоресурсів вищезгаданих видів промислових підприємств [7, 8, 13].

В Україні функціонує майже 200 підприємств чорної металургії, що становить більше 40 % її промислового потенціалу і близько 60 % щорічних фінансових валютних надходжень до бюджету держави*.

Відповідь на питання: залишиться чи не залишиться Україна в десятці світових лідерів із видобутку та реалізації залізорудної сировини для металургії, лежить, перш за все, у сфері вирішення проблеми енергоефективності видобутку та переробки цього стратегічного для держави виду корисних копалин.

Між тим, підприємства цієї, базової для економіки держави галузі, є водночас і володарями значного, притаманного саме їм, енергетичного потенціалу, який поки що не використовується [8-10].

На жаль, слід визнати, що процес упровадження енергоефективних заходів в умовах гірничорудних підприємств держави, який реалізується, як правило, в примітивних варіантах, насправді проходить у турбулентному режимі з відсутністю системного підходу до цього життєво необхідного дійства як для даних підприємств, так і для макроекономіки України в цілому.

Кредит довіри в очікуванні часу вирішення проблеми підвищення електроенергоефективності гірничорудного комплексу України в реаліях сьогодення практично вичерпано.

Між тим, у споживчому комплексі енергоспоживання сучасних гірничорудних підприємств електроенергетика складає майже 90 %. Більше того, як свідчать дослідження [7-10, 12-20], саме електроенергетичні витрати є негативно домінуючим фактом зі стійкою тенденцією постійного зростання в економіці цих підприємств.

Обґрунтування вибору теми дослідження.

Як свідчать дослідження [21-24], логічним, на перший погляд, вихід з такої ситуації шляхом зменшення обсягів споживання електричної енергії на

* Дані наведені на період 01.01.2014 р. до тимчасової окупації частини території України військами російської федерації

даний період не є достатнім заходом для вирішення цієї проблеми, оскільки значно вичерпав свій потенціал, а технологія видобутку корисних копалин взагалі, і залізорудної сировини в тому числі, у процесі їх функціонування передбачає постійне збільшення глибин видобутку, що, логічно, формує процес збільшення рівнів споживання електроенергії. Ця «логіка зростання» стосується всіх без винятку способів видобутку КК. Зокрема, вона (логіка) базується на необхідності відведення природних вод, які накопичуються в гірничих виробках, і котрі необхідно транспортувати на поверхню у спеціальні водозбірники. Сам факт появи цих вод лежить у структурі гідрогеології підземних надр. Загальна величина водовідводу шахт і кар'єрів у Криворізькому залізорудному басейні за умов регіонального впливу гідрогеофільтраційної системи становить 36 - 40 млн. м³/рік [25].

Процес відведення підземних вод, або, як його класифікують гірничі технологи – водовідведення, є енергоємним процесом. ГВК даних видів гірничорудних підприємств являють собою найбільш енергоємні види споживачів ЕЕ [21-25]. В умовах підземного способу видобутку ЗР на цей процес витрачається більше 30 % від всього обсягу електричної енергії, котру споживають дані види підприємств*.

Драматургія цього сегменту електроенергетичного процесу лежить в площині того, що об'єми підземних водоприпливів, у тому числі фактичні та очікувані, не залежать від обсягів виробництва та не підлягають прогнозному оцінюванню, а рівні споживання ЕЕ відповідними комплексами з поглибленням глибин видобутку ЗР збільшуються [15, 17-24].

Це підіймає проблему зменшення енергоємності комплексів водовідведення до рівня першочергово актуальних серед комплексів інших заходів із підвищення енергоефективності гірничодобувних підприємств. Контраргументи в такому форматі рішень взагалі відсутні.

* Ствердження базується на реальних показниках функціонування залізорудних підприємств України до лютого 2022 р.

Важливим доповненням до вищенаведеного є те, що в портфелі архівних наукових рішень таких цікавих заходів, що реально реалізуються, накопичено чимало. У їх числі, як традиційні, так і досить сучасні неординарні варіанти. Та все ж, невизначеність тактики практичної реалізації як одних, так й інших спрямувань, а, точніше, логістики вирішення проблеми, що аналізується, не дали, поки що можливості конвертувати в очікуваному обсязі більшість із відомих досліджень у практику функціонування підземних залізородних підприємств.

Як невеличкий за обсягом штрих, але системовизначаючий за значенням, до вищезгаданого, зауважимо, що в цьому питанні логічним бачиться необхідність у перегляді канонічних форматів визначення рівнів енергоефективності гірничодобувних підприємств взагалі та окремих системоутворюючих з когорти енергоємних, зокрема, що, в свою чергу, дозволить розширити кордони енергоспрямованих напрямків вирішення цієї проблеми з реальним оцінюванням рівня їх ефективності.

Та все ж, у комплексі мультिवаріативності рішень базовим і, поки що недореалізованим, продовжує залишатись базовий (стартовий) варіант підвищення електроенергоефективності функціонування електромеханічних систем насосних агрегатів ГВК – адаптивного керування цим процесом у функції відповідності реальних режимів їх функціонування у максимально наближених за рівнем енергоефективності.

Безумовно, вищевикладене у жодній мірі не ставить під сумнів необхідність і доцільність утілення ряду інших, як канонічного, так і неканонічного спрямувань, заходів щодо підвищення енергоефективності видобутку ЗР. Логічно і те, що максимальний ефект у напрямку підвищення енергоефективності видобутку ЗР може бути, і реально-перфектно буде, досягнуто у варіанті комплексно-оптимального втілення ефективно можливих і доступних, на діючий момент, заходів.

Проте, надважливою генеральною позицією в логістиці вирішення проблеми енергоефективності ГВК, котрої слід дотримуватись, є те, що,

враховуючи стохастичний характер мінливості та зчитуючи поточні параметри і викликану цим відповідну ситуацію у процесі функціонування головних водовідливних установок взагалі, та їх електромеханічних комплексів, зокрема, для підтримання постійності та незмінності на оптимальному рівні енергетичних параметрів цих комплексів необхідно максимально швидко, адекватно та креативно реагувати на ці зміни відповідними управлінськими рішеннями - сигналами для подальшої реакції на це з боку системи керування. Такий формат управління може бути реалізовано автоматизованою системою керування зі штучним управлінським інтелектом. Більше того, у потенціалі свого практичного застосування такий формат дозволяє з упевненістю констатувати як факт, що передумова для розбудови сучасної АСК в умовах вітчизняних залізородних шахт для керування режимами функціонування ГВК даних підприємств існує.

Між тим, для процесу ефективного варіанта структурування такої системи, котра дозволить забезпечити її стійке та комфортне функціонування, необхідно, перш за все, провести верифікацію і формалізувати комплекс вхідних та вихідних параметрів і діапазон їх можливих супроводжуючих розбіжностей з послідуною технологічною реалізацією цього дійства на основі відповідного алгоритму роботи СК, з можливістю переформатування у варіант АСК.

Для цього необхідним вбачається проведення комплексу відповідних превентивних досліджень у цьому спрямуванні.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Дисертаційна робота базується на дослідженнях, що виконуються на кафедрі електричної інженерії Криворізького національного університету. Результати дисертаційної роботи одержано під час виконання державної науково-дослідної роботи «Інтеграція розумних технологій побудови електроенергетичних систем у контексті підприємств гірничо-металургійної галузі», держреєстрація № 0121U111709; ініціативних науково-дослідних робіт «Розробка теоретичних положень та практичних рішень по зменшенню

енергоємності гірничо-рудних виробництв», держреєстрація № 0121U110199; «Аспекти теорії та практики оцінки електроенергетичної конкурентоспроможності залізорудних підприємств», держреєстрація № 0118U006520.

Мета і завдання дослідження

Мета – підвищення електроенергоефективності головних водовідливних комплексів залізорудних шахт у напрямку збільшення рівня використання енергетичного потенціалу цього виду стаціонарних установок, шляхом розробки теоретичних аспектів і практичних рекомендацій для розбудови системи багатокритеріального нечіткого керування режимами функціонування електромеханічних систем насосних агрегатів.

Для цього в дисертаційній роботі форматизовані та вирішені наступні наукові завдання:

– дослідити та сформувати перфектний рейтинг споживачів електроенергії зі встановленням найбільш енергоємного за рівнем та оцінити його динаміку як процесу впливу на узагальнені електроенергетичні параметри функціонування комплексу електропостачання-електроспоживання в умовах сучасних залізорудних шахт, обґрунтувати «дорожню карту» процесу реалізації завдань підвищення електроенергоефективності даних підприємств, взявши за базовий варіант формат відповідного адекватного рішення локального системоутворюючого даний процес споживача;

– переформувати, згідно з ідеологією сучасних спрямувань із підвищення електроенергоефективності функціонування гірничодобувних підприємств, усталене канонічне поняття електроенергоефективності з можливістю переведення його в статус нової концепції, котра узагальнить і розвине рівень реального оцінювання цього показника, відповідно як до статусу гірничого підприємства в цілому, так і його окремих енергоємних споживачів, зокрема;

– проаналізувати існуючі та запропонувати авторський варіант методики оцінювання коливань рівнів споживання електроенергії в періоди часу з найбільшими відхиленнями від середньостатистичних для роботи функціоналу вхідних – вихідних параметрів синтезу управлінських дій з оптимізації цього процесу;

– розробити дослідницьку модель, на основі якої встановити стан відповідності існуючих режимів функціонування електромеханічних систем насосних агрегатів з енергетичними параметрами та потенціалом реального рівня досяжності їх енергоефективності згідно з можливостями та узгодженнями з електромеханічними характеристиками відповідних модулів водовідливних комплексів, як в агрегативному, так і в індивідуальному режимах роботи; розробити на цій основі схему алгоритму енергоефективного керування електромеханічними комплексами насосних модулів – складову загальної структури керування головними водовідливними комплексами залізорудних шахт;

– розробити теоретичні аспекти та практичні рекомендації розбудови системи електроенергоефективного керування головними водовідливними комплексами для умов залізорудних шахт із транзитною можливістю зміни переступної структури у функціонально універсальну, синергетичну за форматом і за структурою прийняття й реалізації управлінських рішень із залученням до цього елементів штучного інтелекту.

Предмет дослідження. Параметри енергоефективного керування головними водовідливними комплексами залізорудних шахт.

Об’єкт дослідження. Електроенергетичні процеси головних водовідливних комплексів залізорудних шахт.

Методи дослідження. Науково-методологічну основу дисертаційної роботи складає сукупність прийомів, принципів, загальнотеоретичних і спеціальних методів наукового дослідження. Для досягнення встановленої мети та розв’язання визначених наукових завдань використовувались: системний підхід – щодо визначення місця і ролі електроенергетичного

комплексу «електропостачання-електроспоживання» в системі енергоефективності залізорудного підприємства; теорії виробничих систем, дослідження операцій – при визначенні сутності керування головними водовідливними комплексами; аналогії, порівняння – для визначення змісту інформаційного забезпечення енергоефективності головних водовідливних комплексів залізорудних шахт; системний і критичний аналіз – при формуванні системи техніко-аналітичних показників та аналізі режимів електроенергоспоживання в умовах залізорудних підприємств; методи компаративного аналізу, статистичного аналізу – для означення вартісно цільових характеристик електроенергоспоживання видів залізорудних підприємств, що аналізуються; математичне моделювання – для розробки моделі оцінювання «електропостачання-електроспоживання» головними водовідливними комплексами як в поодинокому, так і в агрегативному режимах функціонування їх електромеханічних комплексів в умовах залізорудних шахт; морфологічний аналіз – для уточнення понятійно-категорійного апарату за проблемою енергоефективності залізорудних підприємств із підземними способами видобутку залізної руди; методи теорії нечітких множин, нечіткої логіки та нечіткого логічного виведення – для розробки експертної системи керування споживанням електричної енергії електромеханічним обладнанням головного водовідливного комплексу шахти; метод моделювання – для дослідження ефективності роботи системи нечіткого керування електроенергоспоживанням насосних агрегатів водовідливного комплексу щодо зниження рівня матеріальних витрат гірничих підприємств на придбання електроенергії.

Інформативною базою дослідження є офіційні документи Державної служби статистики, різних державних і урядових органів, що відображають і регламентують відповідні аспекти електроенергоефективності, у рамках збирання, оброблення і подання інформації; законодавчі й нормативні акти, офіційні документи державних і урядових органів; первинні документи різних промислових структур; матеріали наукових конференцій і семінарів; ресурси

глобальної інформаційної системи Інтернет; наукові праці вітчизняних і зарубіжних дослідників у галузі, присвяченій проблемам керування енергоефективністю на залізородних підприємствах; результати власних напрацювань. Техніко-економічні розрахунки виконані із застосуванням сучасних методик і комп'ютерних технологій обробки статистичних матеріалів.

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

1. На основі системного підходу з погляду на сучасний період електрифікації гірничорудного виробництва, котрий характеризується значним підвищенням ролі показників техніко-економічної ефективності використання електроенергії в процесі видобутку залізної руди, дослідження сутності енергоємності видобутку, дозволило скоригувати, в новому баченні поточного стану, системоутворюючі енергоємні складові споживання електричної енергії енергоємними споживачами підземних залізородних підприємств як процесу, з оцінюванням характеру його протікання, в тому числі найбільш впливового на цей показник – головних водовідливних комплексів.

2. Вперше для розширення кордонів канонічних визначень електроенергоефективності, в контексті сучасних бачень відповідних заходів, як гірничодобувних підприємств у цілому, так і окремих видів енергоємних споживачів даних підприємств, зокрема, запропоновано нову концепцію визначення цього показника, котра відрізняється від попередньої логікою оцінювання впливу електроенергетичної складової на рівень собівартості – базового економічного показника функціонування гірничих підприємств з видобутку конкретного виду корисних копалин.

3. Досліджено новий ефект процесу водовідведення як стохастичного процесу, що дозволило шляхом використання статистичного матеріалу зі швидкості накопичення води в підземних виробках побудувати синтезовану математичну модель, котра дає можливість визначити такі характеристики

процесу водовідливу як середні та дисперсії, обсяги накопичення води на підземних горизонтах і відповідних енергозатрат на водовідведення із заданих глибин конкретних шахт за визначений поточний період часу. Здобуті результати дозволяють характеризувати водовідлив не тільки за середніми величинами, але й за дисперсіями, тобто за їхнім розкидом, що є системоутворюючим показником для формування системи керування електроенергетикою всього водовідливного комплексу.

4. Вперше для розбудови системи керування головними водовідливними комплексами залізорудних шахт обґрунтовано та систематизовано електроенергетичні параметри функціонування електромеханічних систем з доведення залежності їх впливу на режими роботи насосних агрегатів для формування схеми алгоритму як підсистеми керування даним комплексом у варіанті переступної до узагальненої структури керуючої системи.

5. Розроблено авторський варіант експертної системи керування споживанням електричної енергії з можливістю застосування варіанта автоматизованого управління головними водовідливними комплексами залізорудних шахт із вхідними параметрами, як-то: водоприплив і погодинна вартість електроенергії та вихідним – загальна потужність насосів, на базі нечіткого логічного виводу Мамдані, що використовує гладкі функції приналежності гаусової та сигмоїдної форми.

Практичне значення отриманих результатів полягає у наступному:

– розроблено та запропоновано як варіант для подальшого використання методику оцінювання рівнів споживання електричної енергії енергоємними споживачами залізорудних шахт у цілому та базових у цьому комплексі – головних водовідливних комплексів, зокрема;

– запропоновано синтезовану модель, яка дозволяє визначати такі стохастичні характеристики процесу водовідливу, як середні і дисперсії потужності енерговитрат на водовідлив, обсягів накопичення води на підземному горизонті шахти і енерговитрат на водовідлив із заданої глибини за визначений час;

– здобуті результати дозволяють характеризувати процес водовідливу не тільки за середніми величинами, але й за дисперсіями, тобто за їхнім розкидом;

– форматизовано двоєдиний алгоритм функціонування системи керування водовідведенням залізорудних шахт шляхом реалізації максимально досяжного електроенергетичного потенціалу функціональних електромеханічних параметрів агрегатів насосних модулів з асинхронними двигунами та у функції обсягів водоприпливу і «плаваючих» у годинах доби тарифів на електроенергію, що постачається;

– одержані в процесі наукового пошуку результати впроваджено шляхом передачі відповідних дослідницьких матеріалів для їх практичної реалізації спеціалізованим підприємствам із проектування та монтажу систем електропостачання гірничорудних виробництв: НВО «Ракурс» (м. Кривий Ріг) та ТОВ «Рудомайн» (м. Кривий Ріг), що підтверджено відповідними актами про впровадження;

– результати роботи використовуються у Криворізькому національному університеті на кафедрі електричної інженерії для підготовки фахівців за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», що підтверджено актом про впровадження.

Особистий внесок здобувача. Здобувачем самостійно отримано усі наукові положення та результати дисертаційного дослідження. В роботах, що опубліковано у співавторстві, особистий внесок здобувача наступний: [2] – реалізовано логістику пошуку на основі математичної моделі водовідведення з підземних горизонтів як стохастичного процесу на основі реальних експериментально отриманих даних діючих залізорудних шахт із визначенням вхідних параметрів; [3] – запропоновано структуру математичної моделі електропостачального комплексу підземних гірничих підприємств, де враховано стохастичний характер його діяльності; [4] – визначено варіант моделі для дослідження роботи насосної станції горизонту діючої залізорудної шахти в програмі MATLAB; [5] – запропоновано схему розподіленої багатоканальної нечіткої системи керування процесами шахтного

електроенергоспоживання; [6] – доповнено до відомих варіантів математичну модель насосної станції залізорудної шахти в MATLAB/Simulink; [7] – сформовано загальні методологічні підходи щодо формування прогнозних варіантів водовідливних комплексів із визначенням багатокритеріальної схеми показників споживання електричної енергії у функції їх вартості; [8] – виконано структуру апробації тактики досліджень із моніторингу споживання електричної енергії залізорудними шахтами; [9] – сформовано, як варіант, систему принципів оцінювання електроенергоефективності залізорудних шахт; [10] – проведено чисельне розв’язування рівнянь математичної моделі та візуалізація отриманих результатів у середовищі MATLAB/Simulink; [11] – запропоновано синергетичну математичну модель для оптимізації енергоспоживання за допомогою загальних індексів витрат електроенергії споживачами залізорудних шахт; [12] – визначено алгоритм інтелектуальної системи керування електропостачанням залізорудної шахти з використанням ГАЕС; [13] – виконано дослідження функціональної динаміки електромеханічних систем насосних агрегатів головних водовідливних комплексів залізорудної шахти; [14] – синтезовано модель водовідливного комплексу з такими стохастичними характеристиками, як середні і дисперсії потужності енерговитрат, обсяги накопичення води і енерговитрати на водовідлив із заданої глибини; [15] – запропоновано систему експертного керування енергоспоживанням шахтними водовідливними комплексами на основі алгоритму нечіткого логічного виводу Мамдані.

Апробація матеріалів дослідження. Основні результати дисертаційного дослідження доповідались на конференціях:

– Всеукраїнській науково-практичній конференції студентів та молодих учених «Актуальні питання енергоефективності гірничо-металургійного виробництва», КНУ, м. Кривий Ріг, 2021 р.;

– IEEE International Kharkiv Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW), м. Кременчук, October 03-07, 2022, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University;

- IEEE 8th INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENERGY SMART SYSTEMS, м. Київ, October 12-14, 2022;
- IEEE Kremenchuk University Week: 2022 IEEE 4th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES), October 20-22, 2022, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University;
- Міжнародній науково-практичній та навчально-методичній конференції «Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку» ("Problems of Energy Management System – PEMS"), Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, 2022 р.;
- Міжнародній науково-технічній конференції «Розвиток промисловості та суспільства», КНУ, м. Кривий Ріг, 2023 р.;
- IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (ICSF 2023), 2023.

Публікації. Основний зміст результатів дисертаційної роботи відображено в 15-ти наукових працях, у тому числі: в 1-й монографії, 2-х статтях у міжнародних періодичних виданнях, які внесені до міжнародної науково-метричної бази даних Scopus, 5-ти статтях у фахових наукових виданнях, 7-ми матеріалах конференцій.

Структура, обсяг дослідження. Дисертація має два томи. Том 1: вступ, 4 розділи, загальні висновки, список використаних джерел. Загальний обсяг дисертації (Том 1) становить 188 сторінки, з яких основний зміст викладений на 151 сторінках друкованого тексту, містить 47 рисунків, 16 таблиць. Список використаних джерел складається з 142 найменувань. Том 2: Додатки А-Ж, викладені на 69 сторінках і містять напрямки досліджень з підвищення рівня електроенергоефективності гірничорудних підприємств, застосування теорії виробничих систем в оцінюванні споживання електроенергії, типові архітектури водовідведення діючих залізородних шахт України та експериментальні статистичні дані споживання електроенергії залізородними шахтами України та акти впровадження результатів досліджень.

РОЗДІЛ 1

ФОРМАТИЗАЦІЯ СИСТЕМОУТВОРЮЮЧИХ СКЛАДОВИХ ПРОЦЕСУ ОЦІНЮВАННЯ РІВНІВ СПОЖИВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ НА ПІДЗЕМНИХ ЗАЛІЗОРУДНИХ ПІДПРИЄМСТВАХ

1.1 Вхідні зауваження до стану і напрямків пошуку сучасних спрямувань із підвищення електроефективності функціонування залізорудних шахт

Промисловий комплекс сучасних гірничорудних підприємств України, згідно способів видобутку ЗР, формується підприємствами з підземним способом видобутку (шахти, рудники), відкритим способом (ГЗК: кар'єри, ГЗФ) і, відповідно, змішаним.

У Криворізькому регіоні, базовому для України з видобутку ЗР, гірничорудними підприємствами видобувається більше 85 % від усього загальнодержавного обсягу видобутку даного виду корисних копалин, функціонує п'ять підприємств із відкритим способом видобутку (у тому числі одне зі змішаною формою) і вісім діючих шахт [24]*. Останні на період 2022 р. видобули біля 30 % від загального рівня видобутку ЗР в Україні [24]. При цьому відмітимо значущий для гірничо-металургійної галузі України факт, що з 2000 року в державі реанімовано процес зростання обсягів видобутку ЗР підземним способом. Це позитивний момент як для електроенергетики держави взагалі, оскільки шахти споживають значно менше ЕЕ, а енергоємність видобутку ЗР тут в 2-3 рази менше, ніж у ГЗК, так і, що не менш важливо, для екології та безпеки навколишнього середовища [25].

Та все ж, існуюча в діючий період одіозна проблема постійного зростання рівня собівартості видобутку ЗР – базового продукту макроекономіки України, в умовах функціонування гірничих підприємств, у

* У роботі, згідно з аномальною сучасною економічною ситуацією, коректно проаналізовані реальні статистичні матеріали функціонування підприємств гірничорудної галузі України до 2022 року, оскільки цей рік із відомих причин не є типовим, а показники - тимчасовими

тому числі з підземним способом ведення робіт, у рамках існуючих століттями технологій видобутку пов'язана, перш за все, зі зростанням енергетичного сегмента в цьому комплексному за складом показнику. У свою чергу, важливим для визначення тактики в акценті проведення наукових пошуків є те, що в загальній енергетиці даних видів підприємств домінує з постійним прогресом електроенергетична складова – більше 90 % від загальноенергетичного обсягу споживання [7, 8, 15].

Зрозуміло, що ефективність процесу застосування електроенергії в умовах специфіки гірничовидобувних підприємств із підземним способом ведення гірничих робіт в якісному аспекті характеризується, перш за все, технологією видобутку КК, що адекватно визначає його технічне обладнання, рівень продуктивності та інші властивості, які безпосередньо впливають на рівні споживання ЕЕ (рис. 1.1) [26, 27].

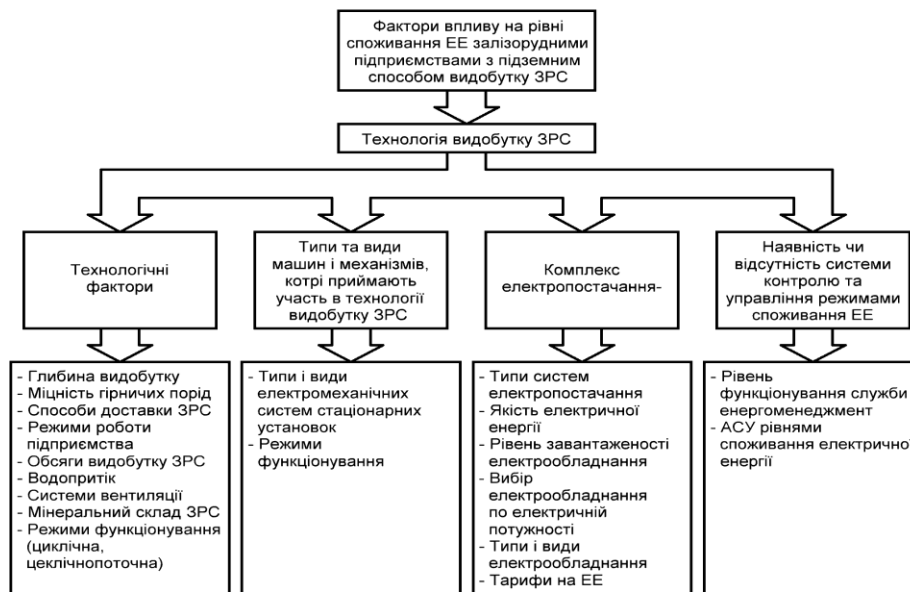


Рисунок 1.1 – Основні фактори впливу на рівні споживання електричної енергії залізородними шахтами

Зазначимо, що, як свідчать дослідження [15], в умовах існуючих технологій функціонування сучасних залізородних шахт, об'єктивний процес – зниження рівнів ведення підземних гірничих робіт цим способом, визначає додатково щорічний приріст обсягів споживання ЕЕ (без урахування постійного зростання цін на ЕЕ), більш ніж на 1 кВт·год. на 1 т ЗР, що

видобувається. Цим самим поглинаються ті частки здобутої енергоефективності, які можуть бути досягнуті і досягаються шляхом запровадження на цих підприємствах ряду тривіальних, але необхідних, заходів, у тому числі, заміною застарілих видів технологічного обладнання, що експлуатується, на нові енергоефективні [26, 27].

Тобто, глобальна задача – зменшення або хоча б утримання темпів зростання електроенергозатрат при видобутку ЗР обмежена потенціалом можливостей існуючих технологій видобутку КК для досягнення позитивних змін у процес електроенергоємності даних видів підприємств.

В цьому аспекті цікавим для подальшої розбудови логістики наукового пошуку є те, що в публічному науковому просторі висвітлено, обґрунтовано та оцінено з поглядів сучасного бачення основні напрямки ведення пошуку (рис. 1.2) [26, 27].

Проте, згідно досліджень [7, 19-21], у тому числі автора [11, 18], квінтесенцією усіх цих вищезгаданих напрямків є два тривіальних, але глобальних, спрямувань – зменшення рівнів споживання ЕЕ і зменшення обсягів сплати за спожиту ЕЕ.

Згідно першого з вищенаведених заходів, який класифікується як комплексний, досягти зменшення обсягів споживання ЕЕ реально, але мало вірогідно, в бажаному обсязі, оскільки за своїм змістом цей захід обмежений в умовах діючих технологій видобутку КК. Між тим, як важлива складова цього спрямування, є реалізація заходів щодо зменшення витрат ЕЕ у внутрішньошахтних СЕП. Тут теж є потенціал, який чекає своєї реалізації [26, 27], але не є метою даного дослідження.

Другий захід, теж комплексного спрямування, – це застосування СЕП із розосередженою генерацією ЕЕ, тобто, розбудова в умовах гірничих підприємств власних автономних джерел генерації електроенергії, які будуть функціонувати, перш за все, на власних ПЕР і які, логічно, позитивно змінять структуру існуючих внутрішньошахтних СЕП та дозволять реально підвищити енергоефективність підприємств у цілому [26, 27].

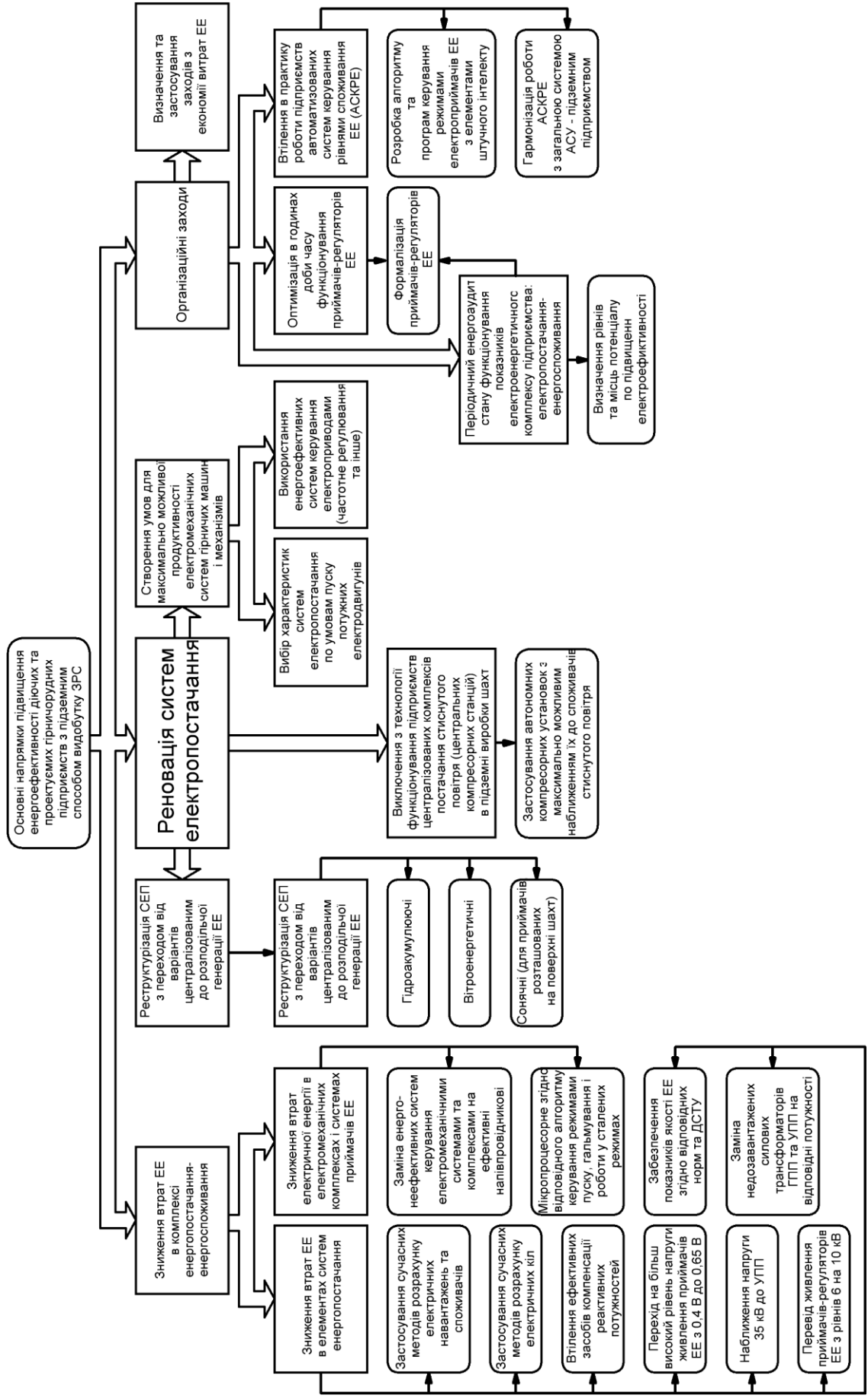


Рисунок 1.2 – Базові спрямування з підвищення електроефективності залізрудних шахт

Та все ж, незважаючи на позитивні перспективи цього спрямування, вони відносяться до заходів із довгостроковим інвестиційним періодом, що в умовах гірничих підприємств України в діючий період проблематично. Між тим, у рамках логіки цього спрямування, ефективним вимальовується ще одне – керування розподілом потоків ЕЕ між енергоємними споживачами підприємства і керування рівнями споживання електроенергії як усім цим комплексом, так і конкретними з них у годинах доби, як базовому тарифному формуванню ціни за спожиту ЕЕ [37]. При цьому останнє, як до речі і всі інші спрямування, безумовно повинно базуватись на сучасному енергоефективному обладнанні з обов’язковим використанням за максимумом енергетичного потенціалу тих чи інших електромеханічних систем конкретного енергоємного споживача.

Згідно такої концепції структури наукового пошуку автора необхідним вбачається наступна логістика пошуку: діагностування електроенергетики даних видів підприємств із рейтинговим оцінюванням електротехнології споживання ЕЕ за видами споживачів; класифікування режимів роботи окремо взятих приймачів як системоутворюючих складових загального процесу електропостачання-електроспоживання з оцінюванням їх рівнів впливу на загальну електроенергетику підприємства; визначення потенціалу і шляхів зменшення негативного впливу сегмента технологічної електроенергетики на загальні показники роботи підприємства та розбудова відповідної системи керування цим процесом.

1.2 Оцінювання і визначення методичних підходів щодо формування техніко-аналітичних показників електроенергоефективності підземних залізородних підприємств

1.2.1 Оцінювання рівнів електроенергоефективності та розробка пропозицій щодо розширення меж канонічних визначень цього показника в умовах сучасних гірничодобувних підприємств

Проаналізувавши перелік спрямувань, які знаходяться в «портфелі» сучасних енергоефективних заходів, спостерігається певна неузгодженість канонічних визначень з оцінювання рівня електроенергоефективності як гірничодобувних підприємств у цілому, так і їх окремих споживачів. Рівень електроенергоефективності, у тому числі і гірничих підприємств, визначається існуючою формулою як частка від ділення обсягів споживання ЕЕ на одиницю виробленої продукції – одну видобуту тону ЗР [28]. Таким чином, розбудова формату дій щодо досягнення очікуваного бажаного зменшення рівнів споживання ЕЕ при умовній сталості обсягів видобутку ЗР в умовах існуючих технологій, не завжди досяжна або вкрай обмежена, про що зазначалось в попередньому розділі.

В останні десятиріччя ряд дослідників, науково обґрунтовуючи, пропонують нові неканонічні підходи до підвищення електроенергоефективності промислових підприємств, у т. ч. гірничих, у суто електроенергоефективному спрямуванні, але які нечітко відповідають формату електроенергоефективності вищезгаданої формули [29-36].

Проаналізувавши наведені складові канонічної формули з оцінювання рівня електроенергоефективності гірничих підприємств, то навіть у примітивному варіанті оцінювання відповідності вищезгаданих спрямувань із підвищення електроенергоефективності, логічним виглядає висновок, що вони, ці заходи, не впливають на складові формули і скоріше є форматом псевдо електроенергетичного – нечіткого рішення. Та все ж вирішують задачу з електроенергоефективності в достатньому обсязі, оскільки позитивно впливають на головний узагальнюючий показник економіки підприємства – рівень собівартості видобутку КК, а, точніше, на електроенергетичну складову цього показника.

Таким чином, вимальовується логічний висновок, що канонічна формула з оцінювання електроенергоефективності гірничодобувних підприємств у цілому і окремих їх споживачів ЕЕ, не є достатньою для оцінювання рівнів сучасних спрямувань в електроенергоефективності

гірничодобувних підприємств. Тобто, для реального оцінювання цього показника – електроенергоефективності в сучасному баченні потрібно мати новий формат оцінювання.

Такий висновок є логічним і тому, що нові спрямування заходів із підвищення показників внутрішньої електроенергетики підприємств розширюються і навіть «диктують», хоча і в коректній формі, законодавчо необхідність розширення меж формату з оцінювань рівнів енергоефективності [37-43]. Затримка у вирішенні зміни існуючого формату оцінювання електроенергоефективності гірничих підприємств, у даному випадку, буде певною перепорою на шляху до пошуку і практичної реалізації нових енергоефективних заходів.

Проте, пошук відповідей на вирішення формату достатності оцінювання показника енергоефективності гірничодобувних підприємств не є головною метою даного дослідження і автор лише щодо дотичної «зачепив» необхідність та доцільність вирішення цієї задачі, остільки, і оскільки, це стосується мети даного дослідження.

1.2.2 Розробка формату техніко-економічних показників електроенергоефективності залізорудних шахт

Головною, і водночас системоутворюючою, особливістю функціонування підприємств із видобутку ЗР в умовах ринку, є те, що координація управлінської діяльності всередині підприємства реалізується у вигляді командно-адміністративного управління і, тим самим, замінює формат ринкової координації. Такий підхід, відповідно до теорії Р. Коуза, базується на тому, що будь-які трансакції (добровільні ринкові угоди) в ринковій економіці пов'язані з витратами і що ці витрати необхідно враховувати в ринковому аналізі [30-33, 36], тим паче, такі дії заохочуються відповідними Державними стандартами [37-41].

У сучасних теоріях з оцінювання рівнів ефективності підприємств значна увага приділяється аналізу діяльності шляхом математичного

моделювання [29-32]. Зокрема, неокласична теорія розглядає підприємство як «чорний ящик» [33], при цьому вхідні змінні – початкові ресурси, вихідна змінна – готова продукція. Підприємство в цій теорії представляється «дійсністю». Підприємство, як і споживач, є первинним логічним елементом техніко-економічної системи.

У даному дослідженні запропоновано підхід до аналізу енергоефективності залізорудного підприємства, як «чорного ящика» (Додаток А, Додаток Б). При такому підході, окрім вхідних і вихідних змінних, враховуються і елементи структури підприємства, істотні з точки зору його виробничої діяльності.

Історично так склалось, що дослідження виробничих систем різного рівня з використанням методу моделювання ґрунтується на припущенні, що виробнича система володіє набором тих же характеристик, інваріантних відносно цілей дослідження, що й звичайні – типові складні системи.

Уваги заслуговують також специфічні питання щодо стійкості виробничих систем. Стійкі рівноважні системи, рівновага яких підтримується ринковим процесом регулювання цін, є типовим прикладом гомеостазису.

Дослідження виробничих систем різного рівня виконується системним підходом із використанням наукової і прикладної методології вирішення «великих проблем».

Використання системного підходу у виробничих системах відкриває шляхи оптимізації структури і функціонування як окремих частин системи, так і системи в цілому. Системний підхід включає системний аналіз і синтез. Він вимагає при прийнятті часткового рішення певної технічної проблеми враховувати усі наслідки цього рішення (прямі і непрямі, сьогоdnішні і віддалені). При прийнятті будь-якого часткового рішення певної технічної проблеми враховуються наслідки рішення.

Одна з важливих задач удосконалювання структур керування споживанням електроенергії – пошук ефективних методів оцінки діючих структур. Виробнича і організаційна структури керування поряд із

технологією керування і системою інформаційного обслуговування – складова частина системи керування енергоефективністю та кінцева мета удосконалювання структур керування складається в підвищенні ефективності керування в цілому. Тому критерієм оптимальності структури керування підприємством є показник енергоефективності.

Труднощі, що ускладнюють розробку методики визначення поняття енергоефективності, полягають у наступному:

- неможливо виділити в чистому виді результат енергоефективності тому, що він виявляється опосередковано в кінцевому продукті;
- ефект від удосконалювання може виявлятися в різних підрозділах (де відбулося впровадження і в суміжних);
- енергоефективність складається з різних за характером результатів (економічних, соціальних, науково-технічних, організаційних, екологічних, інформаційних), певні з яких кількісно не можливо оцінити.

У даний час існують різні підходи до визначення енергоефективності. Існує підхід, при якому ефективність прирівнюється до загальної ефективності виробництва і оцінюється такими показниками, як собівартість продукції, капітальні укладення з урахуванням фактору часу, річний економічний ефект, розрахунковий прибуток, скорочення сумарних витрат праці, продуктивність праці та інші. Пропонуються й узагальнюючі показники, побудовані на основі ряду кінцевих показників діяльності залізорудного підприємства.

Існують різні підходи і різні показники оцінювання енергоефективності. При виборі того чи іншого показника необхідно базуватись на існуючих ДСТУ і відповідних нормативах [37-43], а також враховувати мету виміру енергоефективності, специфіки галузі, а також вимоги, яким покликана відповідати методика визначення енергоефективності [40, 41]. Основні вимоги полягають у наступному:

1. Система виміру енергоефективності повинна бути комплексною, що використовує сукупність показників і відбиває всі складові споживання ЕЕ.

2. Усі показники, необхідні для аналізу і розрахунків, потрібно, за можливістю, брати з існуючої звітності. Створення нових, додаткових форм звітності є крайньою мірою тому, що збільшує і без того величезний документопотік виробничо-господарських комплексів.

3. Система виміру повинна бути єдиною для усіх складових споживання ЕЕ. Це викликано не тільки зручністю, але, у першу чергу, і необхідністю порівнянності результатів оцінки. Різними можуть бути показники, але не методи їхнього розрахунку.

4. Показники енергоефективності повинні найбільш точно відбивати особливості кожного структурного елемента виробничої системи. Для кожної структурної одиниці повинне бути обмежене число порівняльних показників.

5. Необхідно забезпечити зведення усіх показників енергоефективності в єдиний узагальнений, про що було викладено у Розділі 1.1.

1.3 Діагностування стану споживання електроенергії приймачами залізорудних шахт

Стан електроенергетики з метою розробки заходів щодо підвищення технологічних показників цього комплексу в умовах таких енергоємних підприємств як залізорудні шахти природно проводити з диференційованим підходом до рівнів споживання ЕЕ як всією гамою приймачів, так і кожного окремо взятого. Логічним форматом такого підходу є енергобаланс підприємства.

Логістика формування узагальненого формату енергобалансу промислових підприємств взагалі, і гірничовидобувних зокрема, регламентується відповідним державним стандартом України [38] та Законом [37].

Проте, на відміну від вугільних видобувних підприємств, усталеного формату складання енергобалансу саме для умов залізорудних видів підприємств не існує, але необхідність мати такий аналіз вочевидь, у тому числі для розробки тактики визначення спрямувань із покращення

технологічних параметрів функціонування цього електроенергетичного комплексу.

У свою чергу, як свідчать результати десятирічних досліджень з оцінювання видів споживання енергії у вітчизняних залізрудних шахтах [21-24, 26, 27] (рис. 1.3), то тут домінує електроенергетична складова (Додаток В, Додаток Г). Тому, у подальшому пошуку під поняттям енергобалансу, згідно мети дослідження, будемо мати на увазі фактично формат електроенергобалансу.

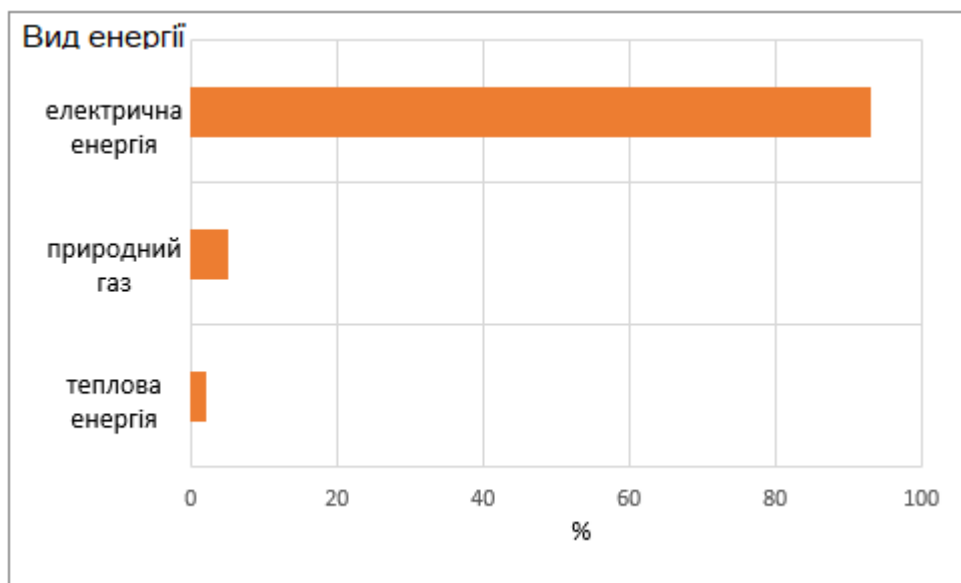


Рисунок 1.3 – Упосереднені складові за видами енергії, яка використовується в умовах функціонування сучасних вітчизняних залізрудних шахт

Складання електроенергобалансу – сегмента узагальненої структури енергобалансу, враховуючи технологію функціонування гірничодобувних підприємств, не простий, але вкрай необхідний для підприємств, процес. У той же час, задача саме такого рівня визначеності являє собою стартову позицію для наукового аналізу і оцінювання стану процесу електропостачання-електроспоживання. У числі складових «труднощів» при складанні електроенергобалансу виступають як природні – об’єктивні фактори, такі як визначення виду і області застосування та формат показників енергоефективності використання ЕЕ, так і ряд суб’єктивних, які визначають

конкретну ціль або комплекс цілей, необхідних для подальшого використання отриманих результатів досягнення мети дослідження. Згідно останнього, сюди відноситься склад первинної інформації для розробки і аналізу енергетичного балансу конкретного підприємства або видів підприємств.

Як правило, до первинної інформації з розробки і аналізу енергетичних балансів промислових підприємств відносять: загальні відомості про підприємство; проектні і звітні (фактичні) дані з енерговикористання; технічні і енергетичні характеристики технологічних процесів та установок; техніко-економічні характеристики енергоносіїв.

Загальні відомості про підприємство повинні включати показники господарської діяльності підприємства.

В якості проектних і звітних (фактичних) даних з енерговикористання, як правило, приймають:

- проектну документацію (паспорт і енергетичний паспорт підприємства, техніко-економічне обґрунтування та ін.);
- діючі форми статистичної звітності.

Технічні і енергетичні характеристики технологічних процесів і установок є основою для розробки аналітичних енергетичних балансів та повинні містити необхідні дані для оцінок ефективності використання енергоносіїв, у тому числі:

- матеріальні потоки (матеріальний баланс);
- витрати і параметри сировини, палива і енергії, відходів;
- конструктивні особливості установок (габаритні розміри, ізоляція, наявність автоматики, вимірювальних приладів тощо);
- режими роботи устаткування (періодичність використання, тривалість перебування в «гарячому резерві» тощо).

Технічні і енергетичні характеристики виявляють для найбільш енергоємного електрообладнання, що використовується.

Техніко-економічні характеристики енергоносіїв включають:

- вартість енергоносіїв;

- параметри енергоносіїв (для електроенергії – напруга, частота);
- графік річного і добового споживання енергоносіїв (для найбільш характерних днів літнього і зимового періодів).

Експериментальні дослідження витрат електроенергії і режимів електричних навантажень дозволяють виконати складання електробалансів на основі найбільш ефективного розрахунково-експериментального методу [38].

Згідно [38] рівняння електроенергобалансу, як системи показників постачання і перетворення електроенергії, що відображає рівність підведеної енергії і суми корисної енергії та її витрат, у загальному випадку має вигляд:

$$W = W_{\text{п}} + W_{\text{л}} + W_{\text{пр}} + W_{\text{м}} \quad (1.1)$$

де W – електроенергія, що підводиться до установки;

$W_{\text{п}}$ – корисна використана електроенергія;

$W_{\text{л}}$ – витрати електроенергії в лініях електропередачі;

$W_{\text{пр}}$ – витрати при перетворенні електроенергії (в електродвигуні, в індивідуальному трансформаторі, у випрямлячі тощо);

$W_{\text{м}}$ – агрегатні витрати.

Вираз величин, що входять у (1.1), можна здійснювати через відповідні показники потужності.

При використанні розрахунково-експериментального методу розрахунок показників витрат електроенергії на технологічні процеси проводиться «зверху вниз», тобто шляхом віднімання витрат електроенергії в установках і мережах із загального обсягу власної енергії, що надійшла на технологічний процес.

Цей вид аналізу проводиться на основі статистичної інформації щодо споживання ЕЕ як на залізорудному підприємстві в цілому, так і на окремих його ділянках зокрема (табл. 1.1, 1.2) (Додаток Г).

Згідно проаналізованих методичних підходів щодо визначення електробалансу необхідно визначити також кількість спожитої ЕЕ менш енергоємними споживачами залізорудного підприємства, що в

загальноспожитому обсязі в середньому на залізорудних шахтах держави складає біля 20 % [8, 18].

Таблиця 1.1 – Описова статистика вихідної статистичної інформації рівнів споживання електроенергії

Показники	Назви шахт			
	«Покровська»	«Криворізька»	«Козацька»	«Тернівська»
Середнє	43247,99	65702,91	43897,76	43271,31
Стандартна похибка	721,45	4042,87	870,10	701,83
Медіана	42827,82	69166,24	43664,51	42972,90
Стандартне відхилення	1767,18	9902,96	2131,31	1719,12
Дисперсія вибірки	3122924,49	98068648,27	4542485,34	2955389,66
Ексцес	2,88	5,63	2,52	-1,60
Асиметричність	1,62	-2,35	1,02	0,31
Інтервал	4762,77	26001,20	6492,22	4443,21
Мінімум	41783,45	45672,34	41181,33	41229,13
Максимум	46546,22	71673,54	47673,55	45672,34
Сума	259487,93	394217,45	263386,55	259627,83

Таблиця 1.2 – Споживання електроенергії складовими ряду залізорудних шахт

Складові	Назви шахт			
	«Покровська»	«Криворізька»	«Козацька»	«Тернівська»
Разом	137847,6	250997,4	156225,5	140063
Скіпові підйомні установки	21878,72	25460,78	48390,59	25543,34
Вентиляція	52903,78	73386,55	49885,08	56412,79
Водовідлив	28153,85	113154,6	8944,53	42632,27
ДСФ	7358,98	11274,15	11086,75	6976,8
Загалом	110295,3	223276,1	118307	131565,2
Інші	27552,28	27721,33	37918,55	8497,75

Таким чином, згідно таблиці 1.2 підтверджується факт, що найбільш енергоємними споживачами залізорудних шахт є головні водовідливні комплекси (Додаток Д). Пріоритет у цьому належить головним водовідливам. Проте, відокремлювати від аналізу інші споживачі ЕЕ не слід, оскільки вони відрізняючись рівнем свого впливу на електроенергетичні показники гірничодобувного підприємства, все ж є споживачами і не повинні випадати з «поля зору» пошуку шляхів підвищення електроенергоєфективності даних підприємств.

У табл. 1.3 наведено розрахунки статистичних показників для інших споживачів, які умовно віднесено до менш енергоємних видів.

Таблиця 1.3 – Статистичні показники менш енергоємних споживачів електроенергії

Показники	Менш енергоємні споживачі шахт
Середнє	25422,48
Стандартна похибка	6140,162
Медіана	27636,81
Стандартне відхилення	12280,32
Дисперсія вибірки	1,51E+08
Ексцес	2,107079
Асиметричність	-1,03492
Інтервал	29420,8
Мінімум	8497,75
Максимум	37918,55
Сума	101689,9

Для візуального аналізу на рис. 1.4 показано співвідношення споживання ЕЕ підземними залізорудними підприємствами.

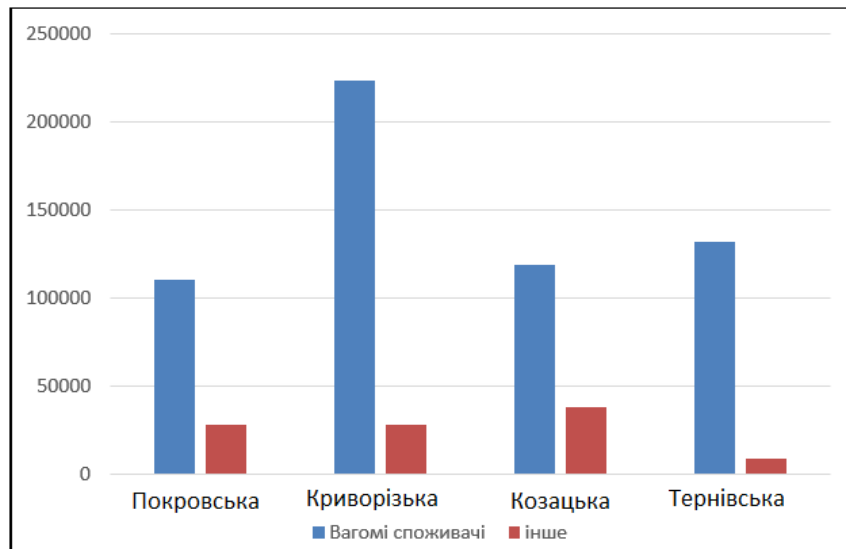


Рисунок 1.4 – Споживання електроенергії рядом залізорудних підприємств із підземним способом видобутку залізної руди

Кількісне співвідношення споживачів залізорудних підприємств, названих нами як «інші», до споживачів ЕЕ, що складають системоутворюючу складову споживання ЕЕ (енергоємні), надано в табл. 1.4.

Таблиця 1.4 – Кількісне співвідношення споживання електроенергії

Назви шахт	«Покровська»	«Криворізька»	«Козацька»	«Тернівська»
Коефіцієнт, %	25	12	32	6

Як свідчить із даних табл. 1.4, найбільшу долю споживання ЕЕ іншими споживачами містить ш. Козацька – 32 %, найменшу долю складає шахта «Тернівська» – 6%.

Така невідповідність частки споживання ЕЕ приймачами різних шахт свідчить, що в процесі споживання ЕЕ необхідним фактором є керування цим процесом, для чого існує і певний потенціал, який визначається індивідуально для конкретного підприємства як дослідницький об'єкт. Між тим, для всіх без винятку видів підприємств, що аналізуються, таким об'єктом у першому варіанті керованості повинен бути найбільш енергоємний споживач із найбільшим діапазоном коливань рівнів споживання ЕЕ в часі.

1.4 Режими і специфіка процесу споживання електричної енергії в умовах підземних залізорудних підприємств*

Логічно, що формалізація параметрів споживання ЕЕ підприємствами і адресне оцінювання рівнів впливу їх системоутворюючих складових у формування існуючого алгоритму функціонування споживачів у цілому, та індивідуально кожного зокрема, є визначення спрямувань для пошуку засобів рішення проблеми енергоефективності та для розбудови відповідної схеми її реалізації.

Аналіз експериментальних досліджень для умов, що аналізуються, які роками і в значній кількості проводились в Україні рядом науковців та особливо науковцями наукової школи під керівництвом д-ра техн. наук, професора Сінчука О.М. у вітчизняних залізорудних шахтах протягом більше ніж 25-ти останніх років, висвітлив, а точніше підтвердив з уточненнями раніше отримані попередниками результати з розподілу електроенергопотоків між споживачами залізорудних шахт [7, 8, 10, 13, 44-47] (Додаток Д).

Підтверджено ствердження, що головною і водночас системоутворюючою специфікою гірничорудних підприємств із підземним способом видобутку залізорудної сировини (шахти, рудники), є факт, який свідчить про те, що близько 60 % від усього обсягу споживання електричної енергії даними видами підприємств належить до споживачів, які у своєму функціонуванні не корегують із продуктивністю роботи підприємства – стану та обсягів видобутку ЗРС [26, 27]. Тобто, близько 50 % споживання ЕЕ цими підприємствами не залежать від того, чи працює підприємство на максимумі своїх проектних можливостей і продуктивності, чи «застигло» на мінімумі цих показників.

* У роботі використовувались результати експериментальних досліджень, які виконувались в умовах вітчизняних залізорудних шахт до лютого 2022 р.

У значній мірі це стосується і законсервованих, тобто непрацюючих шахт, які, незважаючи на свій поточний статичний стан, споживають у середньому близько 40 % від обсягів ЕЕ, що споживалась цим підприємством під час нормального (проектного) його функціонування – з видобутком того чи іншого виду корисних копалин [26, 27] (рис. 1.5).

Важливими факторами, про що свідчать дані, наведені в табл. 1.5, у реаліях специфіки електроенергопостачання підземних гірничорудних підприємств, є збереження кількості енергоємних споживачів і певна зміна – переорієнтація рівнів сегментів електроспоживання ними з роками.

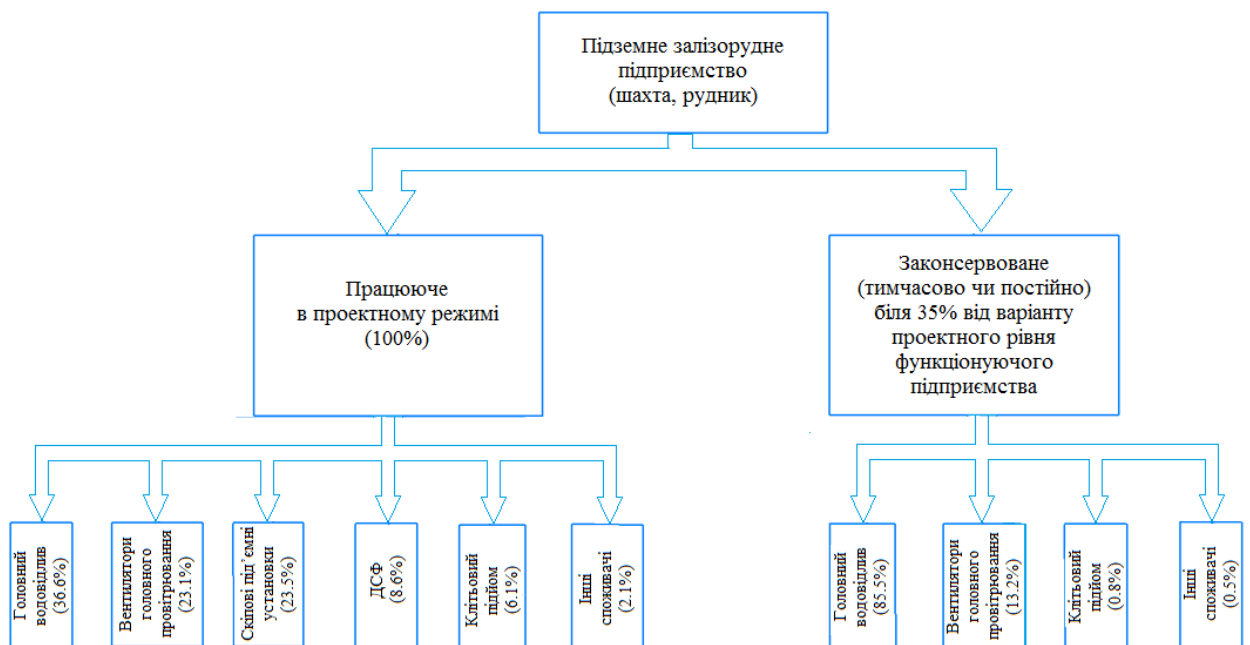


Рисунок 1.5 – Розподіл електроенергопотоків між енергоємними споживачами електричної енергії вітчизняних залізорудних шахт

Між тим, логіка процесу змін у відношеннях рівнів споживання ЕЕ енергоємними споживачами залізорудних шахт із роками апріорно є зрозумілою, виходячи з простих міркувань відносно незмінності існуючих технологій видобутку ЗР. Проте є і певна особливість – специфіка, яка межує із системоутворюючим фактором у цьому процесі (табл. 1.5) [8, 18, 21-24]. Та все ж домінуючою енергетичною негативністю цього процесу залишаються ГВК.

Цікавим фактом для подальших досліджень є те, що відносно відповідних коливань рівнів споживання ЕЕ цими видами споживачів гірничих підприємств протягом місяців року, то тут коливання незначні (рис. 1.6, 1.7). Така невідповідність у рівнях коливань пояснюється, певною мірою, тим, що в останнє десятиріччя, окрім впливу на цей процес технології ведення гірничих робіт, відповідно реагують на тарифи, які з 2019 р. стали погодинними – 24-рьох тарифними, замінивши існуючі до цього трьохтарифні, і самі підприємства – споживачі ЕЕ [37].

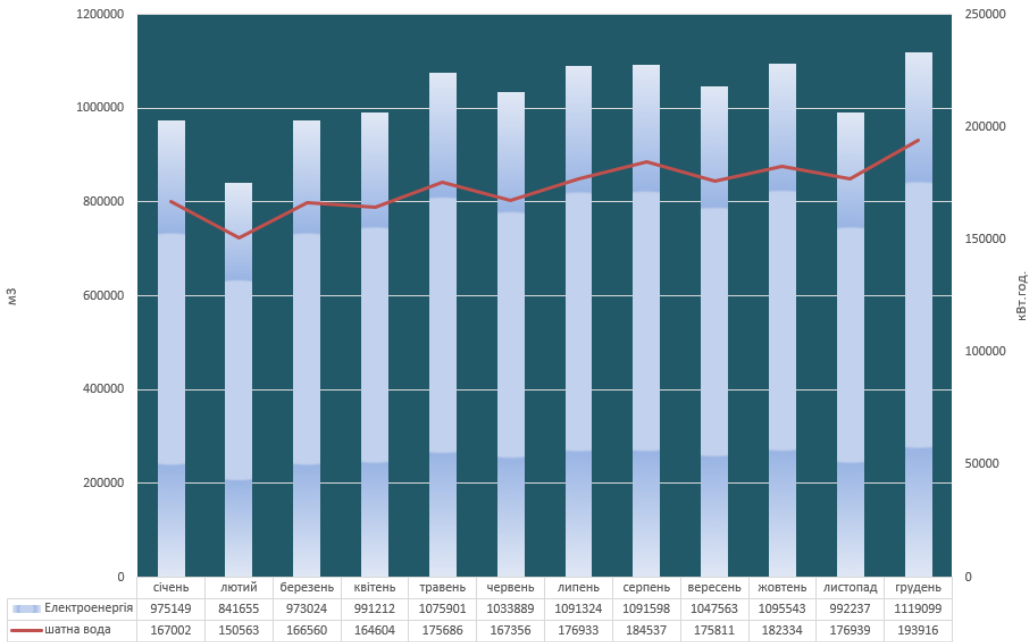
Таблиця 1.5 – Упосереднені показники споживання електричної енергії залізорудними шахтами Криворізького залізорудного регіону

№ з/п	Вид споживача	Споживання ЕЕ шахти в загальному обсязі, %		Відхилення з роками, % (+/-)
		1990 р.	2021 р.	
1	Головні водовідливні комплекси	11,1	36,6	+ 229,7
2	Скіповий підйом	34,8	23,5	- 32,5
3	Вентилятори головного провітрювання	15,6	23,1	+ 21,2
4	Центральні (районні) компресорні станції (ЦКС, РКС)	18,8	Виведено із обліку споживачів ЕЕ шахт	
5	Внутрішньошахтний транспорт – електровозна відкатка руди	6,5	3,8	- 71
6	ДСФ	11,0	8,6	–
7	Інші	2,2	4,4	

На рис. 1.7 для візуального аналізу як приклад наведено співвідношення, що характеризує кількість ЕЕ, яка витрачається на відкачування 1 м³ води з підземних горизонтів шахти ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг».



а)



б)

Рисунок 1.6 – Обсяги водовідведення і відповідних рівнів споживання електроенергії в умовах шахти ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг»:

а) за 2022 рік; б) за 2023 рік

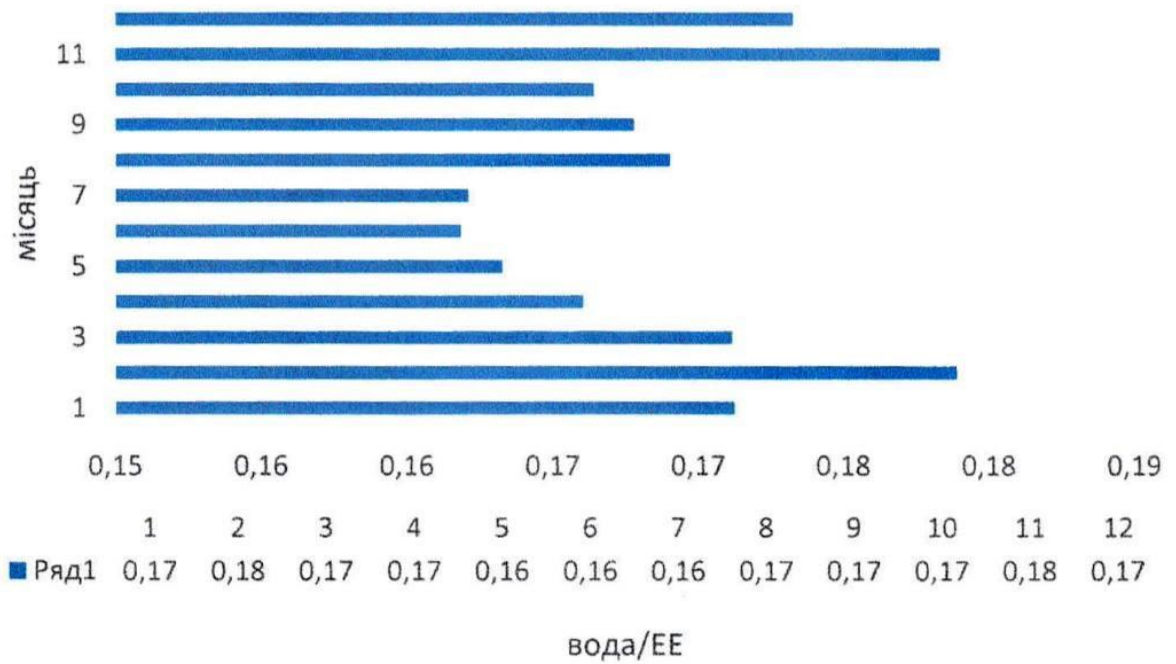


Рисунок 1.7 – Співвідношення, які характеризують витрати електроенергії на відкачування 1 м³ води з підземних горизонтів шахти ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» (2023 р.)

Згідно з рис. 1.6 і типовістю даної шахти з іншими спорідненими, можемо стверджувати про певні коливання щодо обсягів водовідновлення та відповідних на це витрат – найменше витрат ЕЕ на відкачку відбувається в період із 4-го по 7-ий місяці року, що аналізуються. Найбільше – відповідно в 2-му, 11-му і 12-му місяцям.

Статистичне дослідження окремих помісячних абсолютних показників, а саме показників припливу шахтної води і, відповідно, спожитої ЕЕ, дає підстави зазначити: найвищий рівень припливу шахтної води становить 193916 м³ (грудень), найбільше значення показника споживання ЕЕ – 1119099 кВт (лютий). Найменше значення відповідних показників: рівень припливу шахтної води – 150563 м³ (лютий); споживання ЕЕ – 841655 кВт (лютий). Стосовно відносного показника вода/ЕЕ, то маємо зазначити, що найбільше значення відповідає 0,18 м³/кВт (лютий, листопад), відповідно найменше – 0,16 м³/кВт (травень, червень, липень).

Застосовуючи показники варіації, можемо обчислити розмах за формулою:

$$W = C_{\max} - C_{\min},$$

де W – значення показника варіації (розмах);

C_{\max} – максимальне значення показника, що досліджується;

C_{\min} – мінімальне значення показника, що досліджується.

Для абсолютних показників, що аналізуються, маємо:

– рівень припливу шахтної води: $W_1 = 43353 \text{ м}^3$;

– рівень споживання ЕЕ: $W_2 = 277444 \text{ кВт}$;

для відносного показника вода/ЕЕ: $W_3 = 0,02 \text{ м}^3/\text{кВт}$.

Таким чином, на основі проведеного статистичного аналізу щодо варіації змінних, можемо зазначити незначне коливання відносної величини показника вода/ЕЕ.

Проведений аналіз є підґрунтям щодо визначення прийнятних технологічних рішень при вирішенні питань щодо енергоефективності ГВК підземних залізрудних підприємств.

Приблизною, або близькою до цього варіанту, є ситуація на інших залізрудних шахтах Криворізького регіону.

Інший характер процесу водовідведення демонструють добові показники функціонування ГВК залізрудних шахт [10, 13].

Як факт, і як свідчать дослідження [10, 13], в т. ч. як доказ графіки (рис. 1.8), в останні роки додатково до існуючих рівнів коливань, їх розхил збільшився з тенденцією ще більш значних перепадів у годинах доби.

Таке місцеве втручання підприємств у процес штучного формування графіків споживання ЕЕ, яке дає певний позитив у рівнях сплати за обсяги спожитої енергії згідно відповідних тарифів, все ж таки є заходами апріорного плану і породжують нові додаткові проблеми – негативний вплив на надійність та терміни служби електрообладнання [14]. Саме останнє є причиною передчасного «старіння» і передчасного виходу з ладу відповідного електрообладнання.

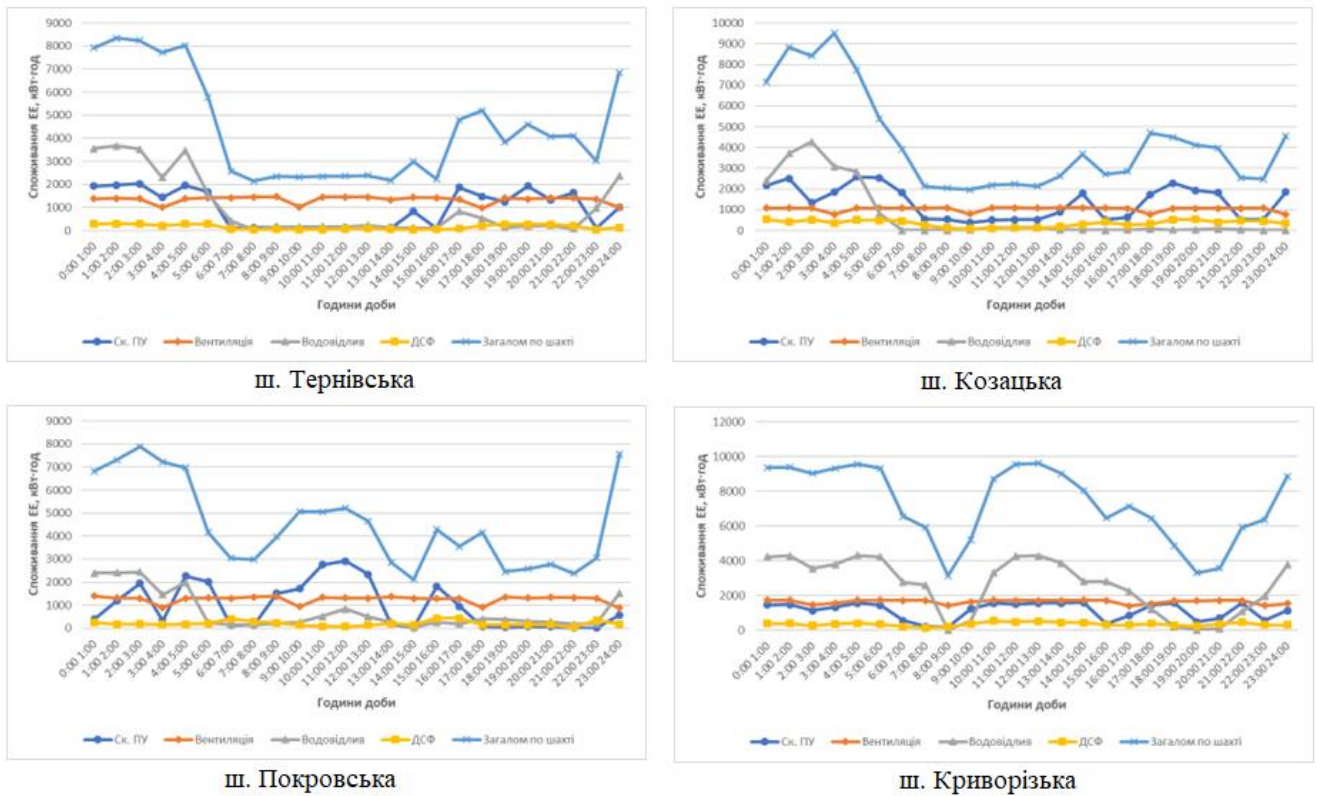


Рисунок 1.8 – Добові графіки споживання електричної енергії залізрудними шахтами Криворізького регіону

Враховуючи саме таку специфіку і те, що вплив її складових на параметри споживання ЕЕ непрогнозований, а значить і визначення відповідних контрольних показників у формуванні собівартості видобутку ЗР на кожному гірничорудному підприємстві має своє підґрунтя, підприємства вимушені (і це добре) планувати перспективу споживання ЕЕ енергоємними споживачами. Проте рівень цих «планувань» не завжди, а точніше рідко, носить свій позитив (рис. 1.6-1.10).

Це є логічним наслідком неефективного «ручного управління» таким непростим і складно підпорядкованим процесом. Як результат, енергетична складова в собівартості видобутку ЗР продовжує своє зростання [27].

Та все ж, сам алгоритм контролю співвідношення рівнів план-факт, хоча і носить характер «диктату», все ж заслуговує на увагу, оскільки позитивно впливає на рівень собівартості видобутку ЗР, зменшуючи, а точніше стримуючи, в наближенні до оптимальних кордонів електроенергетичну складову цього базового комплексного показника – рівня техніко-

економічного функціонування підприємства. Вочевидь і структура, і розбудова технології керування процесом водовідведення залізородних шахт взагалі, та локальною електроенергетикою цього дійства як процесу, зокрема, повинна базуватись на штучному утриманні нульової різниці вищезгаданого співвідношення.

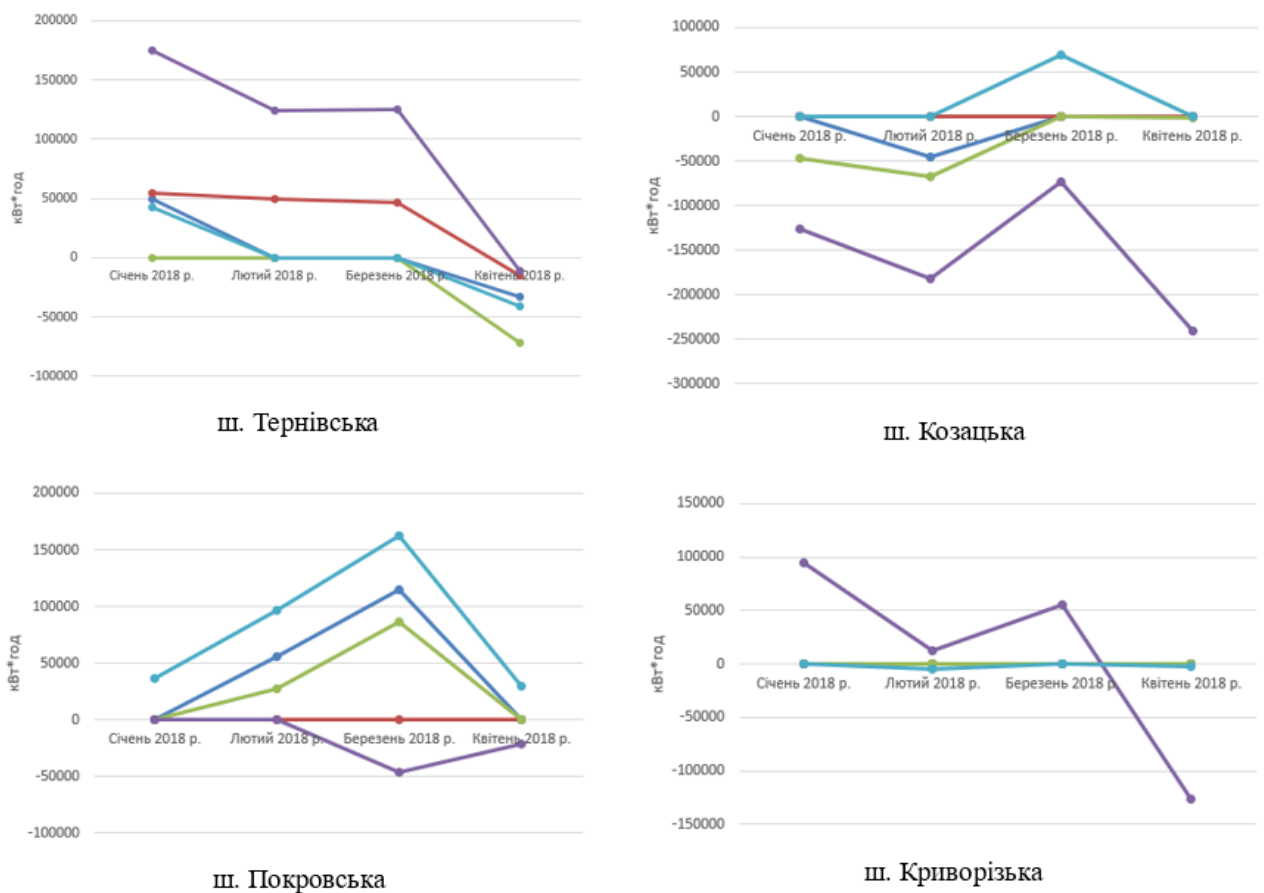
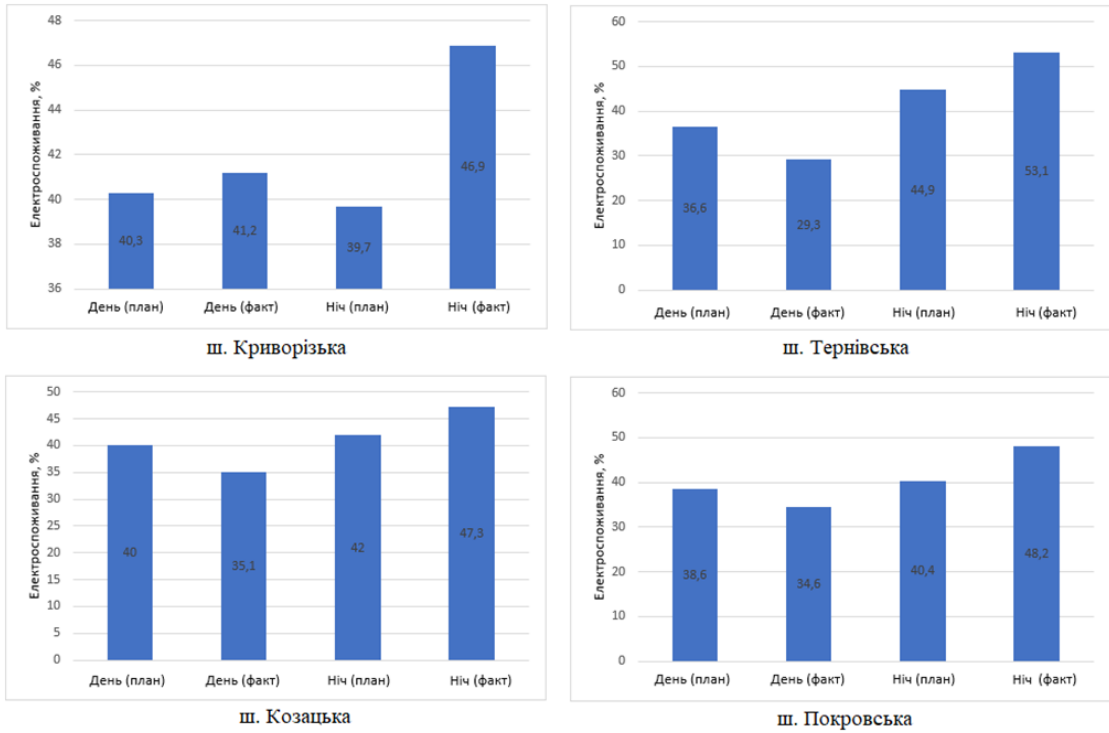
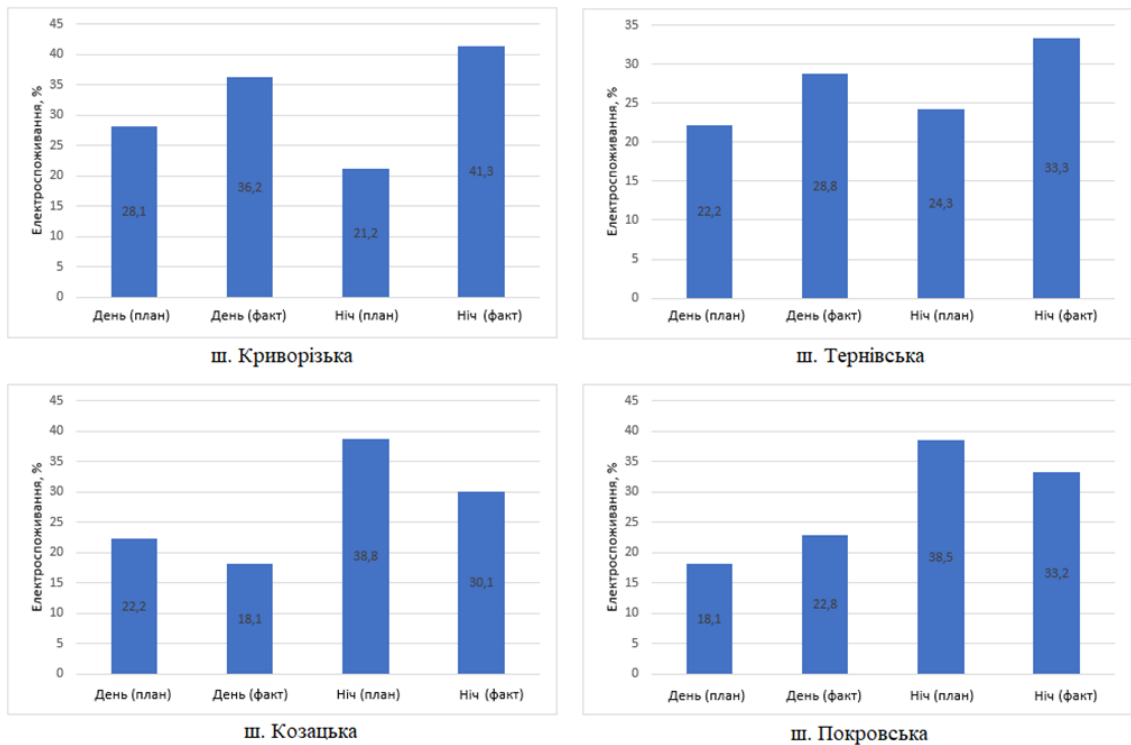


Рисунок 1.9 – Абсолютні відхилення рівнів споживання електричної енергії ряду залізородних шахт Криворізького регіону

Цим моментом у черговий раз підкреслюється пріоритетний із всього потенціалу підвищення енергоефективності стартовий напрямок вирішення проблеми енергоефективності залізородних шахт – головні водовідливні комплекси, як системоутворюючі складові формування рівнів і режимів споживання ЕЕ даними видами залізородних підприємств. Саме це спрямування підлягає подальшому дослідженню в структурі даного наукового пошуку.



а)



б)

Рисунок 1.10 – Співвідношення план-факт добових показників питомого споживання електричної енергії:

а) на 1 січня 2012 р., б) на 1 січня 2021 р.

1.5 Огляд і коректний аналіз відомих наукових досліджень у сфері підвищення енергоефективності головних водовідливних установок шахт

Необхідність і пропозиції заходів щодо підвищення енергоефективності гірничих підприємств в Україні як взагалі, так і енергоефективності головних водовідливних установок (комплексів) шахт зокрема, розглядались та розглядаються в пріоритеті відповідних спрямувань ряду науковців як давніх, так і сучасних періодів досліджень. Зрозуміло, що акценти в теорії і практиці цих досліджень віддзеркалювались у форматі тих періодів часу, в яких вони проводились. Якщо превентивно і водночас коректно провести диференціювання, згідно вищезгаданих дослідницьких періодів, то тут позитивно в авангардному порядку постають дослідження в напрямку розробки систем керування, в тому числі автоматизованого, роботою ГВК. При цьому, як правило, критерієм функціонування АСК був рівень наповненості головних водозбірників ГВК.

Так, необхідний на кінець ХХ-го – початок ХХІ-го століття для практики роботи гірничовидобувних підприємств дослідницький етап у підвищенні ефективності і безпеки функціонування ГВК, який був спрямований на розробку елементарних за алгоритмом роботи АСК водовідведення шахт та кар'єрів, пройдено [48-53]. При цьому сутність автоматизації зводилась до процесу автоматичного включення – виключення насосів ГВК за мірою заповнення підземними водами зумпфів. Після цього креативність подальшого продовження вирішення проблем підвищення ефективності функціонування ГВК була на значний період загальмована і виникла знову, як проблема з новим акцентом – необхідності підвищення енергоефективності ГВК як домінуючих із цього показника серед інших споживачів ЕЕ шахт та рудників [54-63].

Проте, в сучасному баченні вирішення проблеми покращення енергоефективності функціонування ГВК взагалі і їх електромеханічних систем зокрема, реальний позитив у форматі практичної реалізації пошуків,

що аналізуються, був відсутній за фактом «стерильності» вирішення проблеми в існуючих варіантах підходів.

У наступний період акцент у дослідженнях із підвищення енергоефективності ГВК змістився в бік розбудови АСК у функції годин доби – коли максимум часу в добі займає робота установок із водовідведення в економічні години доби, а мінімальна – в пікові, згідно існуючих тарифів на ЕЕ [64-69].

Специфіка та індивідуальні особливості технології функціонування гірничорудних підприємств, зокрема з огляду на проблему підвищення енергоефективності даних виробництв, у різні часові періоди докладно висвітлені в працях ряду вчених: Авілова-Карнаухова Б. Н., Аламахи Н. Л., Берідзе Т. М., Випанасенка С. І., Волотковського С. А., Грейсуха М. В., Гузова Е. С., Дегтярьова В. В., Дрьоміна А. А., Дурнева М., Живова Л. І., Заїки В. Т., Ільченка О. В., Калініченка В. Ф., Качана Ю. Г., Корнілова Г. І., Ляхомського О. В., Майміна С. Р., Мельникова М. В., Полтави Л. І., Півняка Г. Г., Праховніка А. В., Розена В. П., Розумного І. Т., Самойловича І. С., Сінчука О. М., Сінчука І. О., Титюка В. К., Толмачова С. Т., Чорного О. П., Щітки В. Ф., Шкрабця Ф. І., Шуліна М. І., Щуцького В. І. та ряду інших.

Нажаль, значна частка вищезазначених пошуків пройшла непоміченою в практиці роботи вітчизняних гірничовидобувних підприємств. Та все ж, ні в якій мірі не зменшуючи позитиву від глибини наукового пошуку, який був проведений вітчизняними вченими-попередниками, зазначимо, що питання енергоємності для підприємств саме залізорудної галузі України і саме для перфектних умов сьогодення, потребує подальшого вивчення і навіть певного переосмислення шляхів пошуку в досягненні поставленої мети.

Аналізуючи здобутки вчених-пошукачів вирішення проблеми, що аналізується, не коректно було б не зазначити здобутки закордонних колег.

Згідно спрямувань вектору досліджень закордонних вчених, то тут, перш за все, як набувала, так і набуває подальшого розвитку концепція пошуку шляхів зменшення матеріальних витрат за сплату спожитої ЕЕ.

Так, у роботі [70] підтверджено, що прибутки шахт знижуються через високі тарифи на електроенергію, витрати на енергію через значні обсяги її споживання і витрати енергії в шахтних СЕП.

Показано, що існуючі дослідження в спрямуванні, що аналізується, в основному були зосереджені на оптимізації рівнів споживання ЕЕ за окремими напрямками, в тому числі на переплануванні змін і обладнання, чого недостатньо в діючий період часу.

Запропоновано модель реструктуризації процесу використання електроенергії в умовах гірничовидобувної промисловості в форматі існуючої калькуляції витрат на цей процес.

Доведено, що поєднання невідновлювальних джерел енергії з методами перепланування зниження навантаженості і реалізація рекомендованого режиму роботи шахт є найкращим способом зниження витрат на електроенергію на 21,81 % з урахуванням чистої приведеної потужності. Рекомендований режим роботи шахти гарантує зниження витрат на ЕЕ на 8,7 % при витриманні безперервного виробництва.

Дослідження, викладені в [71], підкреслюють, що для мінімізації проблем, які залишають за останні десятиріччя без ретельної утилізації закриті шахти, влада Китаю заохочує реабілітацію цих шахт. У статті досліджуються ризики від застосування альтернативних джерел енергії, включаючи як зберігання, так і генерацію для модернізації покинутих шахт. Наводяться цифрові показники, які характеризують рівні ризиків.

У [72] наведено техніко-економічне обґрунтування гібридного мережевого комплексу відновлювальних джерел енергії з гідроакумулюючою та гідроенергетичною системами в умовах «відкритих» шахт. З метою покращеного скорочення простору пошуку запропоновано відповідний дослідницький алгоритм. Зазначено також, що реалізація шахт як

насосноакумулюючої системи для підключення до електричної мережі фотоелектричних систем є абсолютно новою ідеєю авторів проєкту. Як свідчать матеріали статті, і що вельми цікаво, запропоноване дослідження було практично реалізовано в умовах компактної вугільної шахти.

У [73] розглянуто, проаналізовано і оцінено можливість використання різних технологій із використання підземних вод закритих та затоплених вугільних шахт у долині Лачіана (Іспанія). За допомогою інструменту прийняття рішень зроблено висновок, що найвигіднішим варіантом у цьому випадку є геотермінальне використання води для споживачів сусіднього міста.

У роботі [74] аналізується вдосконалення методів чисельного моделювання для побудови детальних концептуальних моделей із метою оцінювання проєктів штучного удосконалення характеристик дренажних підземних вод у шахтах і деякі міркування щодо ідей, які слід вжити в цьому спрямуванні.

Комплексному аналізу електроспоживання насосами головного водовідливного комплексу шахти присвячена стаття [75]. Автори дослідили робочі характеристики різних насосів, встановлених на горизонті 500 метрів шахти (без зазначення її назви), і порівняли їх із сучасним енергоефективним електромеханічним обладнанням для відкачування шахтних вод. Зокрема, авторами визначено, що насоси, які не проходять капітальних ремонтів, мають вищі питомі витрати електроенергії на перекачування 1 м³ води ніж ті, які ремонтувалися або наново встановлені. Тому, для покращення енергоефективності запропоновано поліпшення технічного обслуговування насосів шляхом перегляду графіків планово-попереджувальних і капітальних ремонтів.

У [76] показано алгоритм оптимізації роботи головного водовідливного комплексу шахти з метою зменшення витрат на електроенергію. Алгоритм має дві стадії. На першій відбувається передбачення рівня водоприпливу в шахту за допомогою експоненційного рухомого середнього (ЕМУ) і провадиться оптимальне планування роботи водовідливу за допомогою методу PSO.

Алгоритм було перевірено із використанням реальних даних, що отримані на одній із шахт КНР.

Свій двостадійний алгоритм оптимізації, приведений в [76], автор поліпшує в роботі [77]. При цьому, обидві частини алгоритму було змінено. Так, у першій частині прогнозується рівень заповнення резервуара водовідливу водою за допомогою подвійного експоненціального згладжування DES, а потім оптимальний план роботи насосів був із залученням алгоритму АСО. Наступні дослідження автор планує присвятити оптимізації роботи головного водовідливного комплексу шахти з різними типами насосів із залученням приведених алгоритмів.

У статті [78], як і в [76] розглядається планування відкачування шахтних вод протягом доби й оптимізація витрат на електроенергію шляхом перенесення споживання потужності насосами на періоди, коли ціна електроенергії низька. Автори, використовуючи модель, яка передбачає водоприплив (метод model predictive control), отримують графік роботи насосів, за можливістю, з низьким рівнем відкачування зранку і ввечері, коли досліджувана шахта отримує електроенергію за невисокою ціною.

Роботи [79-83] висвітлюють перспективи можливостей використання підземних водоприпливів шахт і кар'єрів у якості базових складових для розбудови гідроакumuлюючих та гідроелектростанцій.

Вищенаведений огляд являє собою лише невеличку частку з усього наукового «кошика» пошуків закордонних дослідників. У ряді досліджень, що не аналізуються в даному розділі, розглядаються аналогічні, вище проаналізовані, або близькі до цих варіантів рішення, що дає можливість автору не продовжувати подальший індивідуальний аналіз цих робіт.

На сьогоднішній день позитивна ідея створення акумулюючих електростанцій на основі ГВК шахт і кар'єрів для вітчизняних залізородних підприємств поки що належить майбутньому.

Закінчуючи тему огляду відомих наукових досліджень з проблеми, що аналізується, зазначимо наступне: не зважаючи на певний «природний брак»

у кінцевих ідеях цих рішень, реальним ствердженням є те, що в них закладена передмова для подальшого пошуку і розробки варіативних заходів щодо реального підвищення електроенергоефективності функціонування ГВК. Наукова база є, але для досягнення мети необхідні ідеї «високооктанового» рішення.

1.6 Визначення мети і форматизація наукових задач досліджень

Наведені в попередніх розділах результати досліджень, як визначаючі базові позиції в формуванні динаміки подальшого пошуку, дають можливість окреслити, а в окремих випадках підтвердити, раніше відомі, але не розвинені, напрямки вирішення проблеми підвищення електроенергоефективності залізородних шахт шляхом рішення відповідних задач на прикладі їх найбільш енергоємного системоутворюючого споживача – ГВК з акцентом реалій на пріоритетність етапів реалізації в умовах діючих технологій функціонування даних підприємств.

При цьому логічно і доцільно зазначити наступне. Так, без будь-якої упередженості в ствердженні, а лише на превентивному баченні сучасних напрямків із підвищення енергоефективності ГВК, то тут реально домінує позитивно дратлива ідея – створення на базі водовідливних комплексів шахт і кар'єрів акумулюючих мініелектростанцій [70-74]. Дійсно, ефективність такого спрямування і, що підтверджено як закордонними, так і вітчизняними дослідженнями, значуща як активний захід не тільки у локальному вирішенні проблеми, що аналізується, а і в багатьох інших соціально-економічних.

Це спрямування має простір для активної форми прогресу в умовах шахт і кар'єрів, у тому числі тих, які знаходяться на консервації. Але ці заходи водночас потребують значних інвестицій із значними термінами реалізації цих проєктів. Проте, стосовно розбудови такого вектору закордонних досліджень, то тут є пояснення з акцентом на своєчасність – практично всі інші заходи з підвищення енергоефективності ГВК вони вичерпали на їх гірничовидобувних підприємствах. На жаль, таке ствердження не можна віднести до реалій стану

вітчизняних ГВК шахт і кар'єрів. Та все ж, відносно значного за обсягом потенціалу, який чекає своєї реалізації, в тому числі в умовах вітчизняних гірничих підприємств, то тут є значне за обсягом «дослідницьке поле».

Не претендуючи на абсолютизм, а лише ґрунтуючись на ситуації в гірничовидобувній галузі України, все ж зазначимо, що для прийняття такого варіанту рішення, оцінюючи рівні необхідних інвестицій та терміни їх окупності і, як свідчать результати оцінювання таких проєктів, навіть з їх вражаючими техніко-економічними показниками, не лише для конкретно-локальних підприємств, а й навколишніх сфер діяльності та життя людей [108], і ні в якій мірі не відхиляючи цю ідею, все ж доцільним та логічним рішенням на дійсний період часу відтермінувати ці проєкти в майбутнє.

Підводячи коректно висновки, які отримані автором у результаті досліджень попередніх як вітчизняних, так і закордонних пошуків вирішення проблеми підвищення електроенергоефективності підземних залізородних підприємств, як і інших споріднених видів, констатуємо, що всі вони, на думку автора, не були хибними, а їх певна недостатність або незавершеність у підтвердженні практикою реалізації в відповідних проєктах модернізації ГВК шахт, є віддзеркаленням певної природної обмеженості пошукових кордонів згідно з відповідними поглядами на бачення мети як комплексного пошукового процесу, а не його локалізації.

Та все ж, вже на рівні апріорних вбачань, згідно логіки сприйняття як кінцевого варіанту рішень, так і окремих етапів на шляху дослідження мети – підвищення енергоефективності ГВК – зрозуміло, що для будь-яких варіацій базовою складовою повинна бути розробка енергоефективних електромеханічних комплексів ГВК з енергоефективним керуванням процесом споживання ЕЕ і вже на цій системостворюючій платформі – розбудова (надбудова) інших важливих доповнюючих до позитивного результату кінцевого варіанту агрегативного рішення, тобто, створення відповідної АСК. При цьому, двоєдиною задачею при такому варіанті є підвищення енергетичних параметрів функціонування електромеханічних

систем – складових цих агрегативних комплексів. Як зазначалось у попередньому розділі, саме наукові обґрунтування і результати досліджень науковців у минулому дозволили в різні часові періоди досягти реальних зрушень у цьому питанні. Проте, при цьому певний рівень потенціалу недозавершеності все ж лишається.

При цьому паралельно з головним напрямком досліджень у значній мірі коректності доцільно проаналізувати рівень відповідності канонічних визначень поняття електроенергоефективності, оскільки це є відправним моментом для реального оцінювання функціонування як електроенергетики підприємства в цілому, так і окремих споживачів зокрема.

Мета досліджень – підвищення електроенергоефективності головних водовідливних комплексів залізорудних шахт у напрямку збільшення рівня використання енергетичного потенціалу цього виду стаціонарних установок, шляхом розробки теоретичних аспектів і практичних рекомендацій для розбудови системи багатокритеріального нечіткого керування режимами функціонування електромеханічних систем насосних агрегатів.

Для цього в дисертаційній роботі форматизовані та вирішені наступні **наукові завдання:**

– дослідити та сформувавши перфектний рейтинг споживачів електроенергії зі встановленням найбільш енергоємного за рівнем та оцінити його динаміку як процесу впливу на узагальнені електроенергетичні параметри функціонування комплексу електропостачання-електроспоживання в умовах сучасних залізорудних шахт, обґрунтувати «дорожню карту» процесу реалізації завдань підвищення електроенергоефективності даних підприємств, взявши за базовий варіант формат відповідного адекватного рішення локального системоутворюючого даний процес споживача;

– переформувати, згідно з ідеологією сучасних спрямувань із підвищення електроенергоефективності функціонування гірничовидобувних підприємств, усталене канонічне поняття електроенергоефективності з

можливістю переведення його в статус нової концепції, котра узагальнить і розвине рівень реального оцінювання цього показника, відповідно як до статусу гірничого підприємства в цілому, так і його окремих енергоємних споживачів, зокрема;

– проаналізувати існуючі та запропонувати авторський варіант методики оцінювання коливань рівнів споживання електроенергії в періоди часу з найбільшими відхиленнями від середньостатистичних для роботи функціоналу вхідних – вихідних параметрів синтезу управлінських дій з оптимізації цього процесу;

– розробити дослідницьку модель, на основі якої встановити стан відповідності існуючих режимів функціонування електромеханічних систем насосних агрегатів з енергетичними параметрами та потенціалом реального рівня досяжності їх енергоефективності згідно з можливостями та узгодженнями з електромеханічними характеристиками відповідних модулів водовідливних комплексів, як в агрегативному, так і в індивідуальному режимах роботи; розробити на цій основі схему алгоритму енергоефективного керування електромеханічними комплексами насосних модулів – складову загальної структури керування головними водовідливними комплексами залізорудних шахт;

– розробити теоретичні аспекти та практичні рекомендації розбудови системи електроенергоефективного керування головними водовідливними комплексами для умов залізорудних шахт із транзитною можливістю зміни переступної структури у функціонально універсальну, синергетичну за форматом і за структурою прийняття й реалізації управлінських рішень із залученням до цього елементів штучного інтелекту.

1.7 Висновки до розділу 1

1. Тенденція постійного зростання собівартості видобутку залізної руди – базового комплексного економічного показника функціонування вітчизняних залізорудних шахт, в основі своїй, завдяки стабільності росту

енергетичного сегмента, біля 90 % якого в умовах даних видів гірничих підприємств становить електроенергетика, диктує необхідність вирішення проблеми електроенергоефективності видобутку цього виду корисних копалин як по підприємству в цілому, так і диференційованою по окремо взятих видах споживачів електроенергії.

2. Аналіз встановлених електричних потужностей і рівнів споживання електроенергії споживачами залізорудних шахт підтвердив та дооцінив відомий рейтинг у загальній електроенергетиці цих підприємств. Підтверджено прерогативу впливу на загальний стан електроенергетики залізорудних шахт головних водовідливних комплексів, які володіють біля 40 % від усього обсягу споживання електроенергії підземними споживачами шахт і, враховуючи характер процесу їх електроспоживання, являють собою об'єкт, який першочергово повинен підлягати керуванню.

3. «Причіпним», та все ж одіозним, моментом на шляху до вирішення проблеми, що аналізується, є факт неповноти визначення показника електроенергоефективності в канонічному виді, оскільки в такому форматі він не в повному обсязі відображає реальний стан цього поняття з позицій сучасного бачення шляхів вирішення проблеми. Тому реалії сучасності потребують подальшого пошуку свого формату визначення поняття електроенергоефективності. Запропонований авторський альтернативний варіант визначення цього поняття як відношення суми матеріальних затрат за спожиту даним приймачем електроенергії до об'ємів води, яка відводиться з підземних гірничих виробок шахт є дискусійним і потребує подальшого аналізу та оцінювання рівня відповідності маючим місце реаліям.

4. Аналіз режимів функціонування і споживання електроенергії електромеханічними системами головних водовідливних комплексів дає можливість класифікувати цей процес як стохастичний за характером, що необхідно брати як базу для вибору вхідних і вихідних параметрів при розбудові дослідницьких моделей та алгоритмів штучного керування процесом електроспоживання цим енергетичним об'єктом.

5. При формуванні обсягів спожитої ЕЕ, в тому числі в варіанті використання власних джерел (розподіленої генерації), вихідна \tilde{y} – узагальнене споживання ЕЕ (вихідна величина), що формується з власних джерел (δy) та вхідної ЕЕ – X (вхідна величина), що використовується на підприємстві із зовнішніх джерел. Таким чином, формується вихідна величина споживання ЕЕ: $\tilde{y} = f(x + \delta y)$. Це дає змогу дослідити обсяги і вартість споживання ЕЕ за визначеними складовими (внутрішні і зовнішні джерела), що подалі здійснено в процесі дослідження. Визначено проміжок часу, який характеризується ефективним використанням власної електроенергії.

РОЗДІЛ 2

МОНІТОРИНГ ДИНАМІКИ СПОЖИВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ ГОЛОВНИМИ ВОДОВІДЛИВНИМИ КОМПЛЕКСАМИ ЗАЛІЗОРУДНИХ ШАХТ

2.1 Загальні методичні принципи дослідження електроенергетичного комплексу електропостачання-електроспоживання як динамічного процесу в умовах залізорудних шахт

Як зазначалось у попередньому розділі даного наукового дослідження, досягнення необхідного і потенційно можливого рівня ефективності функціонування електроенергетичного комплексу електропостачання-електроспоживання вимагає дослідження низки проблемних питань, що дозволяє встановити нові явища і сформулювати на основі їх аналізу, синтезу та узагальнення закономірності, що глибше інтерпретують нові факти, отримані на емпіричному рівні знання та дозволяють виконувати прогнозне оцінювання розвитку процесу застосування електроенергії на тих чи інших видах гірничих підприємств.

Процес споживання ЕЕ на гірничих підприємствах у часовому масштабі можна охарактеризувати основними режимами: змінним, місячним і річним.

Сукупність динамік змінного, місячного і річного електроспоживання має тісний взаємозв'язок між технологіями зазначених складових. Процеси електроспоживання на аналізованих часових рівнях мають спрямованість дії від змінного (години доби) до річного рівня. Зміна характеристик споживання ЕЕ на нижчих часових рівнях істотно впливає на величину і динаміку електроспоживання на більш високих часових рівнях.

У зв'язку з цим дослідження процесу в комплексі електропостачання-електроспоживання в часовому аспекті має дозволити давати йому диференційованого виду оцінку на зазначених часових рівнях.

У свою чергу дослідження повинно містити сукупність методів, що досліджують проблемні питання ефективного електроспоживання на гірничих підприємствах.

Між тим, потрібно розуміти, що підвищення ефективності використання електроенергії на гірничих підприємствах нерозривно пов'язане з проблемою оцінювання режимів електроспоживання, що особливо актуально в розрізі специфіки умов ведення гірничих робіт. У цьому доцільно висунути наступні ідеї:

1) Електроспоживання гірничих підприємств залежить від великого числа факторів. Вплив факторів на процес ЕС має складний і різноманітний характер, опис якого в рамках як детерміністичних, так і класичних статистичних методів не завжди можливий через непередбачуваність умов, що визначають дію факторів. У цьому можна констатувати, що ЕС гірничих підприємств формується під впливом чинників, передбачення впливу яких є недостатньо достовірним. Велика кількість різноманітних факторів представляє певні труднощі в оцінці їх впливу на ЕС як у методологічному, так і техніко-економічному аспектах.

2) Інформація про процес ЕС містить різноманітні множини емпіричних даних і характеризує його багатовимірними випадковими ознаками. Значна кількість ознак робить важким завдання виявлення зв'язків між ними. У цьому випадку потрібний опис процесу ЕС меншою кількістю узагальнених характеристик, які відображають внутрішні об'єктивно існуючі закономірності, що не піддаються безпосередньому спостереженню.

3) Зазначені особливості призводять до необхідності застосовувати при оцінці станів режимів ЕС гірничих підприємств методи, що дозволяють отримувати рішення в умовах випадковості процесів. У цьому випадку виникають завдання аналізу даних про ЕС, вирішення яких засноване на застосуванні методів теорії випадкових процесів і встановленні типології об'єктів, що вивчаються.

4) У зазначеному аспекті оцінювання стану процесу ЕС при всьому різноманітті моделей аналіз спирається на положення, яке полягає в тому, що при обстеженні або експерименті, коли емпіричний матеріал містить велику кількість параметрів, багато з них є стохастичними. Це пояснюється тим, що «зовнішні» параметри, які спостерігаються, лише побічно характеризують процес ЕС. Поряд з великою кількістю цих «зовнішніх» параметрів (факторів) існує невелика кількість «внутрішніх» («істотних») параметрів, які важко або неможливо виміряти, але вони визначають поведінку «зовнішніх» параметрів. Знаходження цих гіпотетичних істотних параметрів і є метою аналізу стану процесу ЕС.

Такі параметри (фактори) гірничо-технологічної групи як глибина залягання, розміри родовищ, температура гірських масивів, вид технології, параметри систем розробки, типи машин і обладнання, що застосовуються, та ін., впливають на електроємність та, відповідно, вартість залізородної сировини. Кліматометеорологічні фактори обумовлюють сезонність ЕС, формуючи внутрішньорічну тенденцію його зміни. Електроенергетичні фактори: структурні параметри електричних схем, число, потужність, ККД електроприймачів та ін. зумовлюють формування режимів електричних навантажень. Організаційні й експлуатаційні фактори зумовлюють ступінь експлуатації електроприймачів, рівень збільшених витрат електричної енергії при погіршенні характеристик електрообладнання, машин та механізмів.

Оцінки станів процесу ЕС в умовах стохастичності визначають режими ЕС, використовують вихідну статистичну інформацію для отримання адекватних математичних моделей.

У цьому доцільно розглянути основні процедури оцінки станів режимів ЕС з урахуванням стискування інформації.

Значна частина технологічних електроприймачів гірничих підприємств формують енергетичні режими, мають неоднорідний (з погляду розподілу ймовірностей) характер. У цьому разі розподіл ймовірностей значень ознак вихідної статистичної інформації і перетвореної інформації про процеси ЕП

мають полімодальний характер. Ця обставина вносить певні труднощі під час моделювання процесів ЕС.

Використання статистичних даних споживання ЕЕ спонукає до більш ретельного аналізу основних положень статистики [84-86].

При дослідженні споживання ЕЕ, як процесу, доцільно застосовувати наступні статичні показники:

– середнє

$$\bar{y} = \frac{\sum y_i}{n}; \quad \bar{x}_i = \frac{\sum x_{ij}}{n} \quad (2.1)$$

– дисперсії

$$G_y^2 = \frac{\sum (y_i - \bar{y})^2}{n}; \quad G_{x_i}^2 = \frac{\sum (x_{iy} - \bar{x})^2}{n}; \quad (2.2)$$

– середньоквадратичне відхилення

$$\sigma_y = \sqrt{\sigma_y^2}; \quad \sigma_{x_i} = \sqrt{\sigma_{x_i}^2}; \quad (2.3)$$

– стандартна похибка середнього

$$\sigma_{\bar{y}} = \frac{1}{\sqrt{n}} \sigma_y; \quad \sigma_{x_i} = \frac{1}{\sqrt{n}} \sigma_{x_i}; \quad (2.4)$$

– коефіцієнт варіації

$$V_y = \frac{\bar{y}}{\sigma_y} * 100; \quad V_{x_i} = \frac{\bar{x}_i}{\sigma_{x_i}} * 100; \quad (2.5)$$

– асиметрія

$$A_y = \left\{ \frac{\sum (y_i - \bar{y})^3}{n} : \sqrt{\left[\frac{\sum (y_i - \bar{y})^2}{n} \right]^3} \right\} \frac{\sqrt{n(n-1)}}{n-2}; \quad (2.6)$$

$$A_{x_i} = \left\{ \frac{\sum (x_i - \bar{x})^3}{n} : \sqrt{\left[\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n} \right]^3} \right\} \frac{\sqrt{n(n-1)}}{n-2}; \quad (2.7)$$

– стандартна похибка асиметрії

$$\sigma_E = \sqrt{\frac{6n \cdot (n-1)}{(n-2) \cdot (n+1) \cdot (n+3)}}; \quad (2.8)$$

– ексцес

$$E_{x_{iy}} = \frac{n-1}{(n-1)(n-3)} \left[(n+1) \left(\frac{\mu_4}{\mu_2^2} - 3 \right) + 6 \right], \quad (2.9)$$

де відповідно

$$\mu_4 = \frac{\sum(x_i - \bar{x})^4}{n}; \quad \mu_2 = \frac{\sum(x - \bar{x})^2}{n}; \quad (2.10)$$

$$\mu_4 = \frac{\sum(y_i - \bar{y})^4}{n}; \quad \mu_2 = \frac{\sum(y - \bar{y})^2}{n}; \quad (2.11)$$

– стандартна похибка ексцесу

$$\sigma_E = \frac{24n \cdot (n-1)^2}{(n-3) \cdot (n-2) \cdot (n+3) \cdot (n+5)}. \quad (2.12)$$

Для визначення і аналізу процесів ЕС на шахтах Криворізького басейну було проведено загальний статистичний аналіз засобами ПП *Excel* (таблиці 2.1, 2.2).

Таблиця 2.1 – Вихідна інформація споживання електричної енергії на шахтах Криворізького басейну

Роки	Назви шахт			
	«Покровська»	«Криворізька»	«Козацька»	«Тернівська»
2014	41829,29	68037,22	43544,69	42161,45
2015	41783,45	69874,32	42983,44	44678,34
2016	42678,32	71673,54	43784,32	43784,35
2017	43673,34	45672,34	47673,55	45672,34

Значення середньоквадратичного відхилення залежить від дисперсії генеральної сукупності і обсягу вибірки [97, 98].

У разі неоднорідного енергетичного режиму роботи електроприймачів (при полімодальному розподілі значень електричного навантаження) моделювання процесу ЕС доцільно виконувати з впровадженням із усієї області зміни навантаження стійких рівнів, близькі середні значення яких із певним ступенем розсіяння, варіюються окремо.

Таким чином, можна стверджувати про стохастичність процесу споживання ЕЕ всіма без винятку гірничорудними підприємствами – шахтами України.

Таблиця 2.2 – Описова статистика вихідної статистичної інформації споживання електричної енергії

Показники	Назви шахт			
	«Покровська»	«Криворізька»	«Козацька»	«Тернівська»
Середнє	43247,99	65702,91	43897,76	43271,31
Стандартна похибка	721,45	4042,87	870,10	701,83
Медіана	42827,82	69166,24	43664,51	42972,90
Стандартне відхилення	1767,18	9902,96	2131,31	1719,12
Дисперсія вибірки	3122924,49	98068648,27	4542485,34	2955389,66
Екссес	2,88	5,63	2,52	-1,60
Асиметричність	1,62	-2,35	1,02	0,31
Інтервал	4762,77	26001,20	6492,22	4443,21
Мінімум	41783,45	45672,34	41181,33	41229,13
Максимум	46546,22	71673,54	47673,55	45672,34
Сума	259487,93	394217,45	263386,55	259627,83

2.2 Моніторинг споживання електроенергії в умовах вітчизняних залізрудних шахт як процесу

Для розбудови будь-якого формату системи керування електроенергетичними системами підприємства необхідно знати не тільки кількісні характеристики комплексу електропостачання-електроспоживання об'єкта, а і його поведінку в часі, тобто оцінити та класифікувати вид цього процесу.

Як доведено [92, 93, 99-107] за характером розподілу, що характеризує споживання ЕЕ як окремими споживачами, так і гірничими підприємствами –

залізорудними шахтами в цілому встановлено відповідність цього процесу щодо його стохастичності.

Досить велике поширення при вирішенні різних практичних задач одержали випадкові величини. Випадкова величина характерна тим, що вона в результаті дослідження приймає деяке одне, заздалегідь невідоме, але єдине значення.

Обмежуючись розглядом окремих випадкових величин, випадкове явище вивчається як би «у статиці», в таких фіксованих постійних умовах окремого дослідження.

Однак, такий підхід до вивчення випадкових явищ у ряді практичних задач є явно недостатнім. На практиці приходиться мати справу з випадковими величинами, що безупинно змінюються в процесі дослідження.

Під час дослідження споживання ЕЕ на гірничих підприємствах враховується місячне і річне електроспоживання на змінних рівнях. Для аналізу в даному випадку потрібне подання споживання ЕЕ як часовий ряд, складений із статистичних даних.

Для ідентифікації стохастичного процесу споживання ЕЕ було досліджено і встановлено найбільш енергоємні складові на підземних підприємствах із видобутку залізорудної сировини [99, 102, 106]. В основу такого аналізу було покладено і застосовано принципи системного аналізу. Підтверджено, що такими складовими є: водовідливні комплекси, вентиляційні установки, скіпові підйомні установки, ДСФ. На рис. 2.1 - 2.4 показано споживання ЕЕ на виділених системних складових для кожного підприємства.

Вже в першому наближенні до висновків вочевидь і як свідчить візуальний аналіз часових графіків є всі підстави стверджувати про випадковість процесів споживання ЕЕ вище перерахованими складовими. Стохастичність пояснюється, перш за все, технологічними особливостями видобутку залізорудної сировини, а також як результат втручання ручного керування в цей процес [100-102].

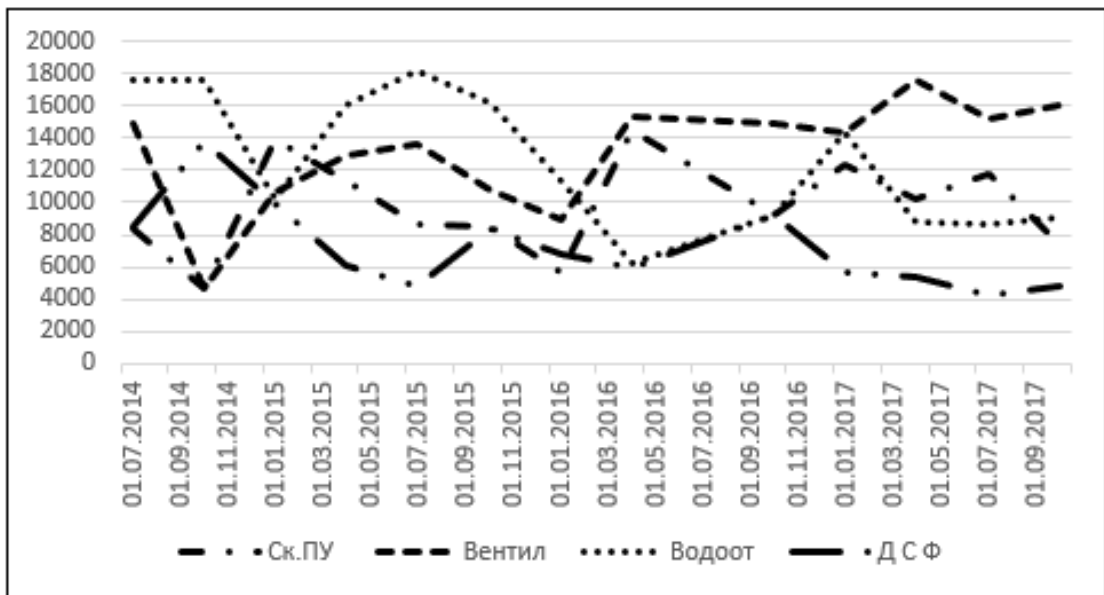


Рисунок 2.1 – Споживання електричної енергії складовими приймачами шахти «Покровська» (м. Кривий Ріг)

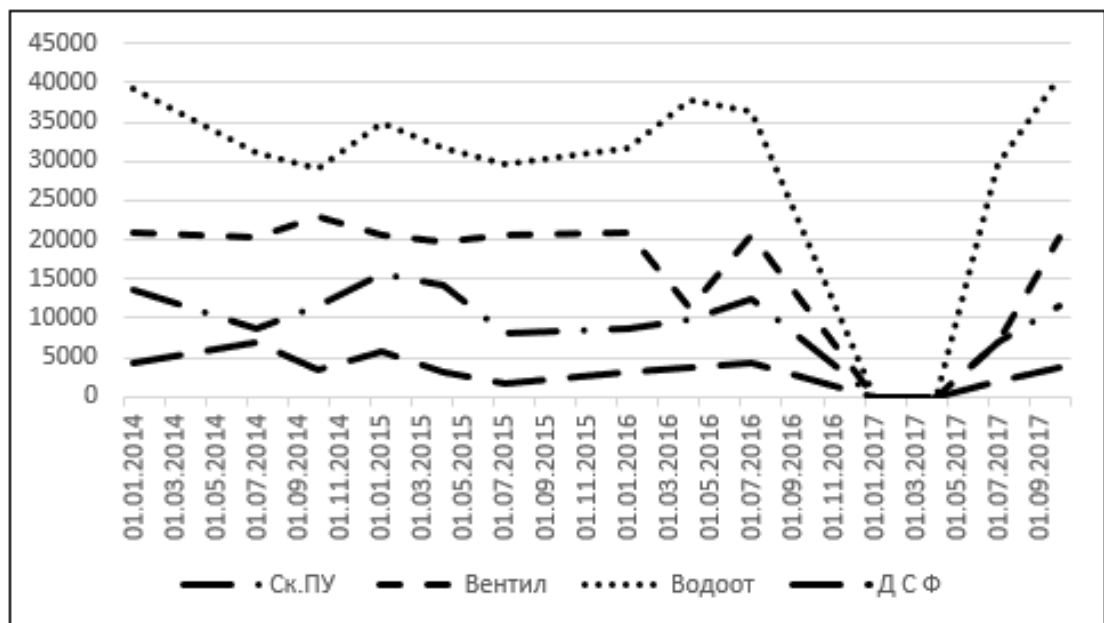


Рисунок 2.2 – Споживання електричної енергії складовими приймачами шахти «Криворізька» (м. Кривий Ріг)

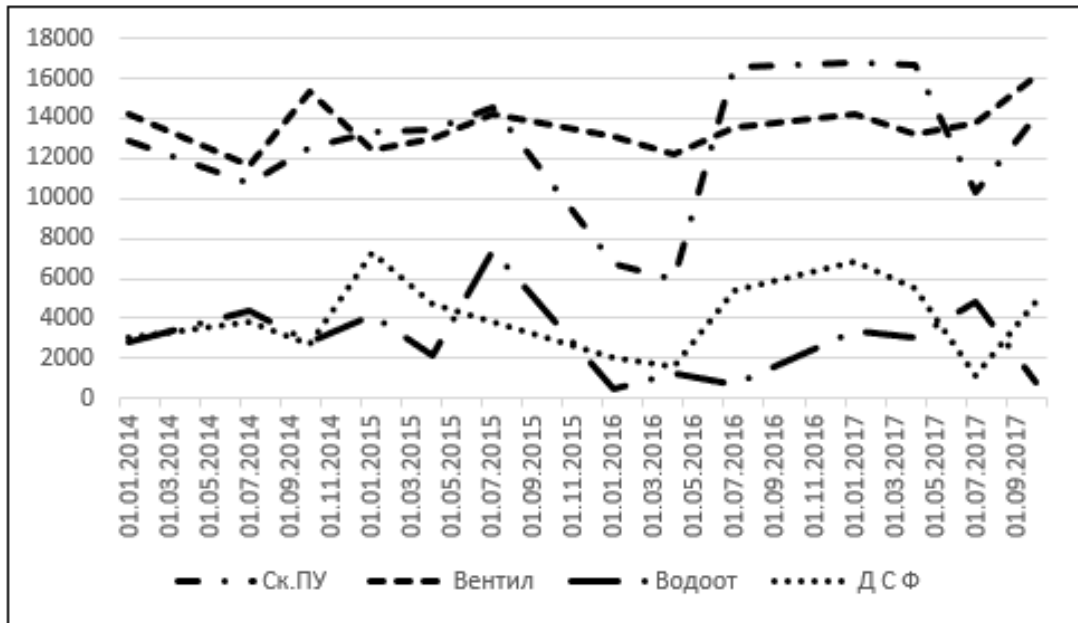


Рисунок 2.3 – Споживання електричної енергії складовими приймачами шахти «Козацька» (м. Кривий Ріг)

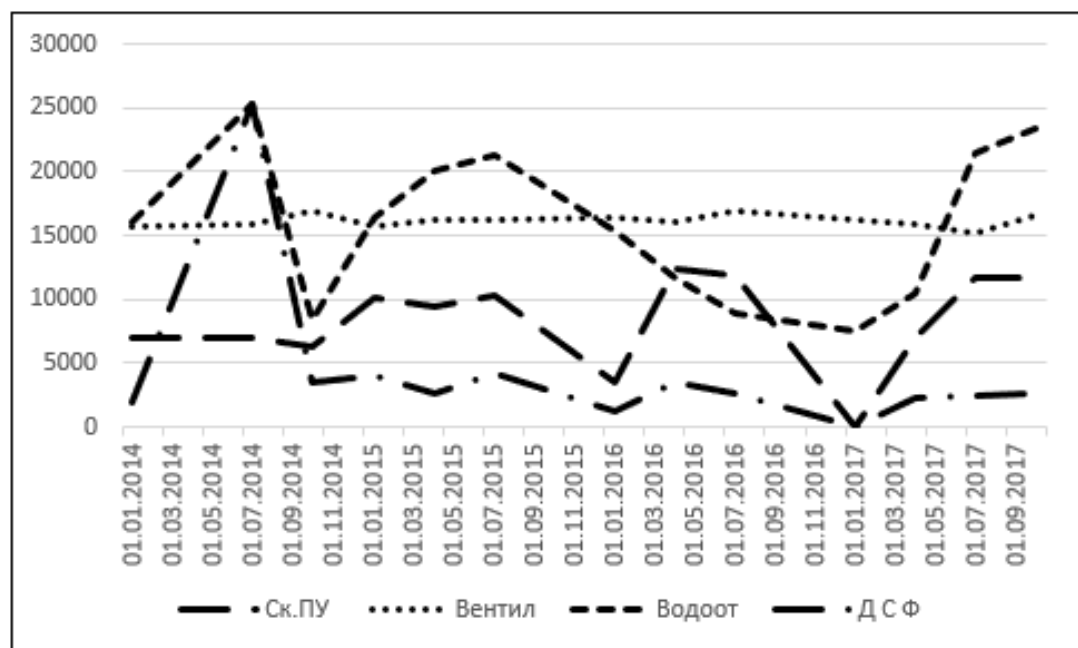


Рисунок 2.4 – Споживання електричної енергії складовими приймачами шахти «Тернівська» (м. Кривий Ріг)

Усі процеси, що спостерігаються і характеризують загалом процес споживання ЕЕ як явища, класифікуються в самому загальному виді як детерміновані та недетерміновані.

Детерміновані – це процеси, що можуть бути описані точними математичними співвідношеннями.

Недетерміновані – це процеси, що не піддаються опису точними математичними співвідношеннями. Точне значення такого процесу в деякий момент часу в майбутньому передбачати неможливо. Ці процеси за своєю природою описуються не точними рівняннями, а за допомогою випадкових функцій і статистичних моделей.

В подальшому, при рішенні конкретних задач враховувалось, що практично рішення при детермінованому або випадковому характеру процесу приймається, виходячи з можливості або неможливості відтворити його при заданих умовах. Якщо багаторазове повторення досліду дає однакові результати (з точністю до помилки виміру), то є підстави вважати процес детермінованим. Якщо повторення досліду в ідентичних умовах призводить до різного результату, то природа процесу є випадковою.

Для можливості подальшого аналізу експериментальних досліджень (Додаток Д) споживання ЕЕ використаємо наступні положення:

1. Спостережувані ознаки є випадковими величинами, що передбачає відповідне забезпечення планування експерименту (обстеження) з урахуванням вибіркового методу.

2. Виникають питання утворення вибірових сукупностей і визначення числа спостережень – вибірок.

Кількість вибірок визначається як для випадкової повторної вибірки:

$$n = \frac{t^2 \delta_0^2}{\Delta^2}, \quad (2.13)$$

де t – аргумент;

δ_0 – значення відносної похибки випадкової величини;

Δ – гранична помилка вибірки, що характеризується найбільшим відхиленням вибіркової середньої від генеральної середньої при заданій ймовірності.

Існують рекомендації про кількість вимірювань (спостережень) при дослідженні споживання ЕЕ [108-110]. Відповідно до цих рекомендацій точність при визначенні розрахункових величин повинна бути в межах $\pm 10\%$. При індивідуальних експериментальних дослідженнях, коли дисперсія визначається з урахуванням статистичної обробки вимірів, рекомендоване значення відносної похибки ($\pm 15\%$) надає допуск в значенні розрахункового навантаження лише на рівні $3\pm 15\%$.

На основі статистичної інформації (Додаток Д) були розраховані відповідні статистичні характеристики означених складових споживання ЕЕ залізородних підприємств. При цьому враховувалось, що безперервний випадковий процес – процес, при якому аргумент t і випадкова функція $x(t)$ можуть приймати як значення на відрізку, так і на всій вісі. В програмному пакеті *Excel* розраховано статистичні характеристики, результати надано в табл. 2.3 - 2.6.

Як свідчать дані табл. 2.3-2.6, випадкова функція з'єднує в собі властивості випадкової величини і функції. Якщо зафіксувати значення аргументу, ця функція перетворюється в звичайну випадкову величину і в результаті кожного послідуочого дослідження вона перетворюється в звичайну (невипадкову) функцію.

Характеризувати таку випадкову функцію можливо, задавши шлях реалізацій, закон розподілу та ймовірнісні характеристики. Сукупність реалізацій випадкової функції характеризує її властивості. Однак, подібно тому як варіаційний ряд тільки приблизно характеризує випадкову величину, так і сукупність реалізацій випадкової функції може характеризувати її властивості тільки з тим або іншим ступенем наближення [84, 85, 98].

Таблиця 2.3 – Статистичні характеристики вибірових сукупностей споживання електричної енергії шахти «Покровська» (м. Кривий Ріг)

Показники	СкПУ	Вентиляція	Водовідлив	ДСФ
Середнє	9698,077	12802,67	12577	7392,833
Стандартна похибка	825,2093	1016,629	1161,515	775,8809
Медіана	9148	13975,5	11362	6455
Мода	0	0	17624	0
Стандартне відхилення	2975,334	3521,707	4187,901	2687,73
Дисперсія вибірки	8852615	12402420	17538514	7223894
Ексцес	-0,69336	1,395145	-1,70323	1,5053
Асиметричність	-0,01005	-1,14441	0,072024	1,189276
Інтервал	9800	12909	11918	9461
Мінімум	4657	4657	6208	4264
Максимум	14457	17566	18126	13725
Сума	126075	153632	163501	88714

Таблиця 2.4 – Статистичні характеристики вибірових сукупностей споживання електричної енергії шахти «Козацька» (м. Кривий Ріг)

Показники	СкПУ	Вентиляція	Водовідлив	ДСФ
Середнє	12670,31	13626,31	2950,692	4066,846
Стандартна похибка	963,4267	345,2778	545,8176	536,6554
Медіана	13292	13534	2823	3880
Мода	0	0	0	0
Стандартне відхилення	3473,684	1244,917	1967,974	1934,939

Продовження таблиці 2.4

Дисперсія вибірки	12066483	1549818	3872920	3743988
Ексцес	-0,04257	0,220913	0,830259	-0,85514
Асиметричність	-0,76507	0,470049	0,803559	0,112745
Інтервал	10826	4548	6927	6190
Мінімум	5979	11625	526	1125
Максимум	16805	16173	7453	7315
Сума	164714	177142	38359	52869

Таблиця 2.5 – Статистичні характеристики вибірових сукупностей споживання електричної енергії шахти «Криворізька» (м. Кривий Ріг)

Показники	СкПУ	Вентиляція	Водовідлив	ДСФ
Середнє	9293,538	15770,08	28610,77	3244,615
Стандартна похибка	1348,895	2308,19	3675,394	554,1602
Медіана	9696	20398	31733	3464
Мода	0	0	0	0
Стандартне відхилення	4863,511	8322,297	13251,82	1998,053
Дисперсія вибірки	23653743	69260620	1,76E+08	3992215
Ексцес	0,404605	0,022119	2,271752	0,058976
Асиметричність	-0,96056	-1,26843	-1,79113	-0,05016
Інтервал	15528	22964	40686	6970
Мінімум	0	0	0	0
Максимум	15528	22964	40686	6970
Сума	120816	205011	371940	42180

Таблиця 2.6 – Статистичні характеристики вибірових сукупностей споживання електричної енергії шахти «Тернівська» (м. Кривий Ріг)

Показники	СкПУ	Вентиляція	Водовідлив	ДСФ
Середнє	8458,417	16163,23	15850,25	4311,692
Стандартна похибка	1100,795	136,0387	1843,844	1773,009
Медіана	9844	16154	15948	2670
Мода	0	0	0	0
Стандартне відхилення	3813,264	490,4945	6387,263	6392,675
Дисперсія вибірки	14540983	240584,9	40797127	40866293
Ексцес	0,71787	0,164116	-1,66354	11,99727
Асиметричність	-1,11027	-0,05756	0,038325	3,403832
Інтервал	12376	1765	17771	25254
Мінімум	0	15197	7483	0
Максимум	12376	16962	25254	25254
Сума	101501	210122	190203	56052

Ймовірнісні характеристики: математичне очікування, дисперсія, кореляційна функція, спектральна щільність характеризують випадкові процеси з цілком припустимою надійністю для практичного застосування.

Доцільним є аналіз кластеризації щодо споживання ЕЕ складовими залізорудного підприємства.

Міра близькості приймалась як внутрішньогрупова сума квадратів відхилень між кожним членом і середньою за кластером. Якість кластеризації забезпечується мінімізацією обраної міри близькості:

$$y = \sum_{i=1}^n \sum_{x \in p_j} \|x - m_i\|^2 = \min, \quad (2.14)$$

де n – число кластерів;

P_i – множина образів, що входять в i -й кластер;

X – вектор вимірювання електричного навантаження;

m_i – вектор вибірових середніх для множини P_i .

Кластеризація електричного споживання за наведеною схемою дозволяє отримати безліч стійких рівнів споживання і час їх дії t_{Π} :

$$P = \{P_1, P_2, \dots, P_n\} \quad (2.15)$$

$$t = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$$

Аналіз споживання ЕЕ змінює традиційне уявлення про характер розподілу споживання ЕЕ у вигляді нормального, покладеного в основу розрахункових методів. Тому доцільно досліджувати процеси споживання ЕЕ як випадкові. У зв'язку з нетрадиційним розглядом потрібно аналізувати загальні визначення величин, що використовуються в розрахунках.

Для споживання електроенергії за аналізований період (наприклад, зміну) розрахунок можна записати:

$$P_c \cdot t_{3M} = \sum_{i=1}^n P_i \cdot t_i, \quad (2.16)$$

де P_c – середнє навантаження за зміну t_{3M} .

Почлено розділивши ліву і праву частини на $P_{\text{ном}}$ й t_{3M} та ввівши позначення:

$$P_c = P_c / P_{\text{ном}}; P_i^* = P_i / P_{\text{ном}}; t_i^* = t_i / t_{CM}; K_r = P_i^* / P_i, (r = 2, 3, \dots, n) \quad (2.17)$$

і прийнявши за максимальний рівень навантаження P^* , одержано:

$$P_c^* = P_1^* \cdot t_1^* + K_2 \cdot P_1^* (1 - \sum_{t=1, t \neq 2}^n t_i) + \dots + K_n \cdot P_1^* (1 - \sum_{t=1, t \neq n}^n t_i) \quad (2.18)$$

або

$$P_c^* = P_1^* \left[t_1 + \sum_{r=2}^n K_r \cdot P_1^* (1 - \sum_{t=1, t \neq r}^n t_i) \right]. \quad (2.19)$$

Отриманий вираз дозволяє дати опис споживання ЕЕ для складових із неоднорідним характером роботи як випадкового процесу.

Описані процедури дозволяють реалізувати основні ідеї про процес споживання ЕЕ, що приймаються при дослідженні та оцінці його станів, як випадкового процесу.

Таким чином, проведені дослідження дозволяють:

- встановити закономірності споживання ЕЕ;
- розрахувати відповідні статистичні показники;
- проаналізувати процедури, які дають можливість в умовах слабкої інформативності найбільш повно використовувати статистичну інформацію для отримання адекватного опису процесу споживання ЕЕ;
- побудувати математичні моделі, які повинні мати оптимальні властивості, що дозволяють мінімізувати середньоквадратичну помилку при описі реальних процесів, а також зменшувати міру невизначеності, в умовах якої проводиться математичний опис.

2.3 Формат практичного варіанту побудови стохастичної моделі процесу водовідведення залізородних шахт

Схеми функціонування ГВК залізородних шахт, маючи свої індивідуальні системоутворюючі для даного підприємства особливості, все ж у значній мірі дублюють одна одну і, як правило, являють собою комбіновані агреговані структури (Додаток Г, Додаток Е). Базовим показником, який порівнює ГВК усіх залізородних шахт, як зазначалось у Розділі 1, є системоутворююча стохастичність процесу водовідведення в годинах доби [100-111].

Внаслідок цього, необхідним аспектом в оцінюванні режимів їх функціонування для подальшої розбудови алгоритму керування цим процесом у форматі СК має цифровий супровід аналітики цього процесу. Методика визначення характеристик водовідливу, необхідних для подальшого пошуку, який застосовується в даний час, має недостатню точність, оскільки розрахунки проводяться за середніми величинами, не враховуючи стохастичність процесів, які, як зазначалось попереду, мають місце в роботі

ГВК [99-107]. Як доведено автором у ході превентивного вибору методів досліджень, врахування стохастичності шляхом математичного моделювання водовідливу із застосуванням ІТ-технологій дає можливість удосконалити відомі варіанти обчислень і отримати очікуваний рівень відповідності характеристик ГВК в умовах залізорудних шахт.

При цьому процес водовідведення підземних вод на денну поверхню є досить відчутним у загальному обсязі матеріальних витрат на видобуток ЗР [7-10]. Внаслідок цього, велике значення має відстеження в цифровій формі технологічних процесів, пов'язаних із водовідливом, що можливо проводити шляхом математичного моделювання при наявності широкого застосування ІТ технологій. Із цією метою розглянуто побудову математичної моделі водовідливу на прикладі відповідних параметрів типової діючої залізорудної шахти. Для цього скористаємося законом збереження енергії. Для підйому води з підземного горизонту шахти необхідно виконати роботу [111]:

$$da = g \cdot h \cdot dm, \quad (2.20)$$

де dm – елемент маси води, кг;

g – прискорення вільного падіння, м/с²;

h – глибина, з якої відкачується вода, м.

Якщо враховується обсяг води, то формула (2.20) набуває вигляду:

$$da = \rho \cdot g \cdot h \cdot du, \quad (2.21)$$

де ρ – щільність води, кг/м³;

du – елемент обсягу води, м³.

Для переведення енергії в кВт·год. скористаємося коефіцієнтом $\delta = 2,78 \cdot 10^7$ кВт·год/Дж.

Тоді формула (2.21) набуде вигляду:

$$da = \rho \cdot g \cdot h \cdot \delta \cdot du. \quad (2.22)$$

У свою чергу, формула (2.22) з урахуванням значень величин $\rho = 10^3$ кг/м³, $g = 9,8$ м/с² набуває вигляду:

$$da = \beta \cdot h \cdot du, \quad (2.23)$$

де $\beta = \rho \cdot g \cdot \delta = 0,002724 \text{ Н/м}^3$.

Формула (2.23) дозволяє обчислити роботу, необхідну для підйому на висоту h елемента об'єму води du .

Враховуючи, що

$$du = v(t)dt, \quad (2.24)$$

де $v(t)$ – швидкість накопичення води в момент часу t , $\text{м}^3/\text{год}$.

формула (2.23) прийме вигляд:

$$da = \beta \cdot h \cdot v(t)dt. \quad (2.25)$$

Тоді залежність затраченої потужності енерговитрат для підйому води визначиться формулою:

$$n(t) = \beta \cdot h \cdot v(t), \quad (2.26)$$

де $n(t) = \frac{da(t)}{dt}$ – потужність, кВт.

Разом із цим, в черговий раз підкреслимо, що в реальних умовах швидкість накопичення води на підземному горизонті шахти є стохастичною функцією, оскільки в кожний момент часу викликана різними наперед невідомими причинами [101, 106, 107]. Внаслідок цього і потужність енерговитрат, яка необхідна для забезпечення водовідливу, теж буде випадковою функцією. У результаті формула (2.26) прийме вигляд:

$$N(t) = \beta \cdot h \cdot V(t), \quad (2.27)$$

де $V(t)$ – випадкова швидкість накопичення води в момент часу t , $\text{м}^3/\text{год}$,

$N(t)$ – випадкова потужність енерговитрат у момент часу t , кВт.

Нехай аналіз швидкості накопичення води як стохастичної функції дозволив визначити такі її числові характеристики, як середнє $\bar{v}(t)$ і дисперсію $D(V(t))$. Тоді, згідно формули (2.27), маємо такі числові характеристики потужності енерговитрат як стохастичної функції:

$$\text{середнє } \bar{n}(t) = \beta \cdot h \cdot \bar{v}(t) \text{ і дисперсію } D[N(t)] = \beta^2 \cdot h^2 \cdot D[V(t)]. \quad (2.28)$$

Здобуті результати дозволяють врахувати стохастичний характер зміни швидкості накопичення води на підземному горизонті шахти при обчисленні потужності енерговитрат для водовідливу із заданої глибини підземного горизонту шахти. Таким чином, для характеристики потужності енерговитрат для водовідливу із заданої глибини підземного горизонту шахти треба враховувати не тільки її середню величину, але і дисперсію.

На практиці виникають питання, пов'язані з необхідністю обчислення обсягу накопиченої води на підземному горизонті шахти за заданий проміжок часу, тобто, обчислення інтеграла від швидкості накопичення води як стохастичної функції

$$U(T) = \int_0^T V(t) dt, \quad (2.29)$$

де $[0;T]$ – заданий проміжок часу накопичення води, год.

В цьому випадку необхідно існування кореляційної функції стохастичної функції $V(t)$, яку позначимо символом [11]:

$$K_v(t', t''). \quad (2.30)$$

Для існування інтеграла (2.29) в заданій області верхньої межі T повинен існувати в тій же області подвійний інтеграл:

$$\int_0^T \int_0^T K_v(t', t'') dt' dt''. \quad (2.31)$$

Припускаючи, що умова існування інтеграла (2.31) виконана, визначено кореляційну функцію стохастичної функції (2.30):

$$\begin{aligned} K_u(t_1, t_2) &= M \left[(U(t_1) - M[U(t_1)])(U(t_2) - M[U(t_2)]) \right] = \\ &= M \left[\int_0^{t_1} \int_0^{t_2} (V(t') - M[V(t')])(V(t'') - M[V(t'')]) dt' dt'' \right], \end{aligned}$$

де $M[\bullet]$ – математичне очікування.

Міняючи місцями операції інтегрування і знаходження математичного очікування, одержано:

$$K_u(t_1, t_2) = \int_0^{t_1} \int_0^{t_2} K_v(t', t'') dt' dt'' . \quad (2.32)$$

В окремому випадку, коли підінтегральна функція в (2.29) стаціонарна, формула (2.32) набуває вигляду [12]:

$$K_u(t_1, t_2) = \int_0^{t_1} \int_0^{t_2} K_v(t'' - t') dt' dt'' . \quad (2.33)$$

Разом із цим, залежність підінтегральної функції від різниці змінних дозволяє позбавитись від подвійного інтегралу, тобто, спростити обчислення:

$$K_u(t_1, t_2) = \int_0^{t_2} (t_2 - \tau) K_v(\tau) d\tau + \int_0^{t_1} (t_1 - \tau) K_v(\tau) d\tau - \int_0^{t_2 - t_1} (t_2 - t_1 - \tau) K_v(\tau) d\tau . \quad (2.34)$$

Зокрема, якщо $t_1 = t_2 = T$, то формула (2.34) буде визначати дисперсію інтеграла (2.29):

$$D[U(T)] = 2 \int_0^T (T - \tau) K_v(\tau) d\tau , \quad (2.35)$$

а середньоквадратичне відхилення з урахуванням (2.35) визначиться формулою:

$$\sigma[U(T)] = \sqrt{2} \cdot \sqrt{\int_0^T (T - \tau) K_v(\tau) d\tau} . \quad (2.36)$$

У свою чергу, при інтегруванні стохастичної функції (2.29) застосовано операцію знаходження математичного очікування до обох частин рівності:

$$M[U(T)] = M \left[\int_0^T V(t) dt \right] . \quad (2.37)$$

Змінюючи місцями операції знаходження математичного очікування і інтегрування

$$M[U(T)] = \int_0^T M[V(t)] dt , \quad (2.38)$$

тоді

$$\bar{u}(T) = \int_0^T \bar{v}(t) dt . \quad (2.39)$$

Математичне очікування інтеграла від стохастичної функції дорівнює інтегралу від математичного очікування цієї функції. Таким чином, розгляд швидкості накопичення води як стохастичної функції, зокрема застосування її кореляційної функції, дозволяє визначити такі числові характеристики обчислення обсягу накопиченої води на підземному горизонті шахти за заданий проміжок часу як математичне сподівання і середньоквадратичне відхилення.

У свою чергу, на практиці виникають питання, пов'язані з необхідністю обчислення обсягу енерговитрат для водовідливу із заданої глибини підземного горизонту шахти за заданий проміжок часу, тобто, обчислення інтеграла від потужності для водовідливу як стохастичної функції:

$$A(T) = \int_0^T N(t) dt , \quad (2.40)$$

де $[0;T]$ – заданий проміжок часу накопичення води, год.

Якщо скористатися формулами (2.27) і (2.29), то формула (2.40) прийме вигляд:

$$A(T) = \beta \cdot h \cdot U(T) . \quad (2.41)$$

Враховуючи результати, здобуті вище для інтеграла (2.29), можна записати числові характеристики обсягу цих енерговитрат як стохастичної функції. Згідно формули (2.39), математичне очікування обсягу енергозатрат запишеться у вигляді:

$$\bar{a}(T) = \beta \cdot h \cdot \bar{u}(T) . \quad (2.42)$$

В свою чергу, дисперсія обсягу енерговитрат для такого водовідливу за визначений проміжок часу запишеться у вигляді:

$$D[A(T)] = 2\beta^2 \cdot h^2 \cdot \int_0^T (T - \tau) K_v(\tau) d\tau , \quad (2.43)$$

а середньоквадратичне відхилення прийме вигляд:

$$\sigma[A(T)] = \beta \cdot h \cdot \sqrt{2} \sqrt{\int_0^T (T - \tau) K_v(\tau) d\tau}. \quad (2.44)$$

Отримані в ході досліджень результати дозволяють врахувати стохастичний характер зміни швидкості накопичення води на підземному горизонті шахти при обчисленні потужності енерговитрат, обсягу накопичення води і енерговитрат на водовідлив із заданої глибини за заданий проміжок часу. Показано, що для характеристики потужності енерговитрат, обсягів накопичення води і енерговитрат на водовідлив треба враховувати не тільки їх середні величини, але й середньоквадратичні відхилення, які характеризують їх розкид.

Якщо швидкість накопичення води на підземному горизонті шахти є нормальним стохастичним процесом, то енерговитрати на водовідлив із цього горизонту теж будуть нормальним стохастичним процесом, властивості якого повністю визначаються його середнім і дисперсією [104, 106]. Для цього достатньо скористатися відповідними нормальними щільностями ймовірності. Так, для потужності енерговитрат на водовідлив із підземного горизонту шахти щільність ймовірності, з урахуванням (2.28), має вигляд:

$$f(n(t)) = \frac{1}{\beta \cdot h \cdot \sqrt{2\pi} \cdot \sigma[V(t)]} e^{-\frac{(n(t) - \beta \cdot h \cdot \bar{v}(t))^2}{2 \cdot \beta^2 \cdot h^2 \cdot D[V(t)]}}. \quad (2.45)$$

Треба відзначити, що стохастичність потужності енерговитрат на водовідлив дає можливість вирішення «задачі про викиди» [99, 106]. Якщо вважати, що досліджуваний процес є стаціонарним, то формули, згідно «задачі про викиди», запишуться так: середній час перебування випадкової функції вище заданого рівня a протягом заданого проміжку часу T , середнє число викидів за цей же час і середня тривалість викиду, відповідно:

$$\bar{t}_a = T \cdot \int_a^\infty f(n) dn, \quad (2.46)$$

$$\bar{m}_a = T \cdot \int_0^\infty w \cdot f(a, w) dw, \quad (2.47)$$

$$\bar{\tau}_a = \frac{\int_a^{\infty} f(n)dn}{\int_0^{\infty} w \cdot f(a, w)dw}, \quad (2.48)$$

де $w = \frac{dn}{dt}$ – швидкість зміни потужності енерговитрат на водовідлив, кВт/год;

$f(n)$ – щільність ймовірності розподілу ординат потужності енерговитрат на водовідлив;

$f(n, w)$ – двовимірна щільність ймовірності розподілу ординат потужності енерговитрат на водовідлив та їх швидкостей.

Далі доцільно розглянути середнє число викидів в одиницю часу:

$$\bar{v}_a = \frac{\bar{m}_a}{T}, \quad (2.49)$$

або, згідно (2.47),

$$\bar{v}_a = \int_0^{\infty} w \cdot f(a, w)dw. \quad (2.50)$$

Для нормального стаціонарного стохастичного процесу щільність ймовірності потужності енерговитрат на водовідлив із підземного горизонту шахти, згідно (2.45), має вигляд:

$$f(n) = \frac{1}{\beta \cdot h \cdot \sqrt{2\pi} \cdot \sigma_n} e^{-\frac{(n-\bar{n})^2}{2 \cdot \sigma_n^2}}, \quad (2.51)$$

де $\sigma_n = \beta \cdot h \cdot \sigma[V]$,

$$\bar{n} = \beta \cdot h \cdot \bar{v}.$$

Ордината потужності енерговитрат на водовідлив із підземного горизонту шахти та її швидкість зміни є незалежними величинами, тому двовимірна щільність ймовірності розподілу ординат потужності енерговитрат на водовідлив та їх швидкостей розпадається на добуток нормальної щільності ймовірності ординат потужності енерговитрат на

водовідлив і нормальної щільності ймовірності швидкості зміни ординати потужності цих енерговитрат, що дає можливість написати:

$$f(n, w) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_n} e^{-\frac{(n-\bar{n})^2}{2 \cdot \sigma_n^2}} \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_w} e^{-\frac{(w-\bar{w})^2}{2 \cdot \sigma_w^2}}, \quad (2.52)$$

де σ_w – середньоквадратичне відхилення швидкості зміни ординати енерговитрат на водовідлив;

\bar{w} – середня швидкість зміни ординати енерговитрат на водовідлив.

Дисперсія швидкості зміни ординати енерговитрат на водовідлив знаходиться за формулою:

$$\sigma_w^2 = \left| \frac{d^2 K_n(\tau)}{d\tau^2} \Big|_{\tau=0} \right|. \quad (2.53)$$

Разом з цим, внаслідок стаціонарності випадкового процесу, середня швидкість зміни ординати енерговитрат на водовідлив із підземного горизонту шахти дорівнює нулю:

$$\bar{w} = 0. \quad (2.54)$$

Для середнього числа викидів в одиницю часу підстановка (2.52) в (2.50), з урахуванням (2.54), дає формулу:

$$\bar{v}_a = \int_0^{\infty} w \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_n} e^{-\frac{(a-\bar{n})^2}{2 \cdot \sigma_n^2}} \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_w} e^{-\frac{w^2}{2 \cdot \sigma_w^2}} dw. \quad (2.55)$$

Виносячи постійні члени за знак інтегралу в (2.55):

$$\bar{v}_a = \frac{\sigma_w}{2\pi \cdot \sigma_n} e^{-\frac{(a-\bar{n})^2}{2 \cdot \sigma_n^2}} \cdot \int_0^{\infty} \frac{w}{\sigma_w} e^{-\frac{w^2}{2 \cdot \sigma_w^2}} dw. \quad (2.56)$$

Користуючись заміною змінної, обчислено інтеграл із формули (2.56):

$$\int_0^{\infty} \frac{w}{\sigma_w} e^{-\frac{w^2}{2 \cdot \sigma_w^2}} dw = \left| \begin{array}{l} x = -\frac{w^2}{2 \cdot \sigma_w^2} \quad dx = -\frac{w}{\sigma_w^2} dw \\ w = 0 \rightarrow x = 0 \\ w = \infty \rightarrow x = -\infty \end{array} \right| = -\sigma_w \cdot \int_0^{-\infty} e^x dx = \sigma_w \cdot e^x \Big|_{-\infty}^0 = \sigma_w. \quad (2.57)$$

Підставляючи (2.57) в (2.56), остаточно знайдено:

$$\bar{v}_a = \frac{\sigma_w}{2\pi \cdot \sigma_n} e^{-\frac{(a-\bar{n})^2}{2\cdot\sigma_n^2}}. \quad (2.58)$$

Середню тривалість викиду знайдено, підставляючи (2.58) в (2.48),

$$\bar{t}_a = \pi \frac{\sigma_n}{\sigma_w} e^{-\frac{(a-\bar{n})^2}{2\cdot\sigma_n^2}} \int_a^\infty f(n) dn. \quad (2.59)$$

Враховуючи (2.51), отримано:

$$\bar{t}_a = \pi \frac{\sigma_n}{\sigma_w} e^{-\frac{(a-\bar{n})^2}{2\cdot\sigma_n^2}} \int_a^\infty \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_n} e^{-\frac{(n-\bar{n})^2}{2\cdot\sigma_n^2}} dn. \quad (2.60)$$

Для обчислення інтегралу в (2.60) використано функцію Лапласа:

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-\frac{t^2}{2}} dt. \quad (2.61)$$

В (2.60) виконано заміну змінної:

$$\int_a^\infty \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_n} e^{-\frac{(n-\bar{n})^2}{2\cdot\sigma_n^2}} dn = \left| \begin{array}{l} x = \frac{n-\bar{n}}{\sigma_n} \quad dx = \frac{1}{\sigma_n} dn \\ n = a \rightarrow x = \frac{a-\bar{n}}{\sigma_n} \\ n = \infty \rightarrow x = \infty \end{array} \right| = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\frac{a-\bar{n}}{\sigma_n}}^\infty e^{-\frac{x^2}{2}} dx. \quad (2.62)$$

Використано лінійність інтегралу за проміжком інтегрування:

$$\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\frac{a-\bar{n}}{\sigma_n}}^\infty e^{-\frac{x^2}{2}} dx = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\frac{a-\bar{n}}{\sigma_n}}^0 e^{-\frac{x^2}{2}} dx + \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^\infty e^{-\frac{x^2}{2}} dx = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^\infty e^{-\frac{x^2}{2}} dx - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{\frac{a-\bar{n}}{\sigma_n}} e^{-\frac{x^2}{2}} dx \quad (2.63)$$

Згідно (2.63) інтеграл (2.62) записано у вигляді:

$$\int_a^\infty \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_n} e^{-\frac{(n-\bar{n})^2}{2\cdot\sigma_n^2}} dn = \Phi(\infty) - \Phi\left(\frac{a-\bar{n}}{\sigma_n}\right) = \frac{1}{2} - \Phi\left(\frac{a-\bar{n}}{\sigma_n}\right). \quad (2.64)$$

З урахуванням (2.64) формула (2.60) має вигляд:

$$\bar{t}_a = \pi \frac{\sigma_n}{\sigma_w} e^{-\frac{(a-\bar{n})^2}{2\cdot\sigma_n^2}} \left(\frac{1}{2} - \Phi\left(\frac{a-\bar{n}}{\sigma_n}\right) \right). \quad (2.65)$$

При відхиленні від середнього значення, тобто $a = \bar{n}$, формула (2.65) спрощується та приймає вигляд:

$$\bar{\tau}_a = \frac{\pi \sigma_n}{2 \sigma_w}. \quad (2.66)$$

Операція інтегрування стохастичної функції зводиться до додавання ординат стохастичної функції і подальшого переходу до межі. З іншого боку, із загального курсу теорії ймовірностей відомо, що сума будь-якого числа доданків, що утворюють систему нормальних величин, дає нормальну величину. Тому можна стверджувати, що інтеграл від нормального стохастичного процесу є також нормальним процесом, який повністю може бути охарактеризований його математичним очікуванням і кореляційною функцією, оскільки задається нормальною щільністю ймовірності, яка повністю визначається математичним очікуванням та середньоквадратичним відхиленням. Таким чином, якщо швидкість накопичення води на підземному горизонті шахти є нормальним стохастичним процесом, то обсяг накопичення води на підземному горизонті шахти і обсяг енерговитрат на водовідлив із цього горизонту теж будуть нормальними стохастичними процесами, властивості яких повністю визначаються їх математичними сподіваннями та дисперсіями. Так, для обсягу накопичення води на підземному горизонті шахти за визначений час щільність ймовірності має вигляд:

$$f(u(T)) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sqrt{\int_0^T (T-\tau) K_v(\tau) d\tau}} e^{-\frac{(u-\bar{u}(T))^2}{4 \int_0^T (T-\tau) K_v(\tau) d\tau}}. \quad (2.67)$$

В свою чергу, для обсягу енерговитрат на водовідлив із підземного горизонту шахти за визначений час щільність ймовірності має вигляд:

$$f(a(T)) = \frac{1}{\beta \cdot h \cdot \sqrt{2\pi} \sqrt{\int_0^T (T-\tau) \cdot K_v(\tau) d\tau}} e^{-\frac{(a-\beta \cdot h \cdot \bar{u}(T))^2}{4 \beta^2 \cdot h^2 \cdot \int_0^T (T-\tau) \cdot K_v(\tau) d\tau}}. \quad (2.68)$$

В якості прикладу моделювання водовідливу як стохастичного процесу, для наочності й обґрунтованості отриманих висновків, розглянемо водовідлив на конкретній діючій шахті «Тернівська» Криворізького залізорудного басейну. На рис. 2.6 представлено графік швидкості накопичення води на горизонті 1000 м шахти «Тернівська (м. Кривий Ріг)» протягом 50 годин (перша частина реалізації за 100 годин).

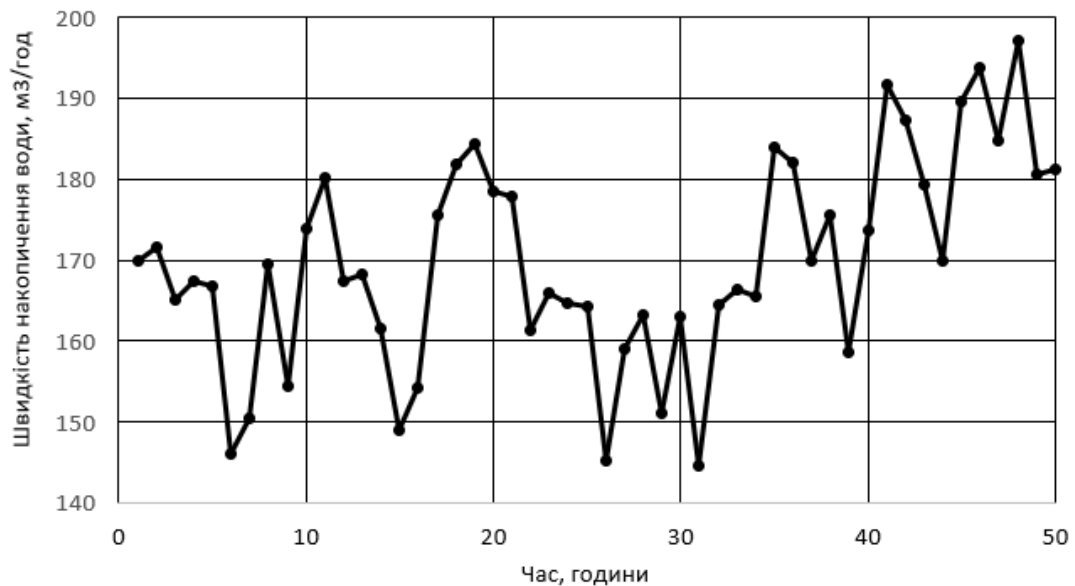


Рисунок 2.6 – Швидкість накопичення води на підземному горизонті залізорудної шахти «Тернівська» (м. Кривий Ріг)

Аналіз графіка, приведеного на рис. 2.6, показує, що швидкість накопичення води є стохастичним процесом. Середня швидкість накопичення води за визначений час (100 годин) склала величину:

$$\bar{v} = \frac{1}{100} \sum_{i=1}^{100} v_i = 170 \text{ м}^3/\text{год.} \quad (2.69)$$

В свою чергу, дисперсія дорівнює:

$$D[V] = \frac{1}{99} \sum_{i=1}^{100} (v_i - \bar{v})^2 = 196 \text{ (м}^3/\text{год)}^2. \quad (2.70)$$

Для перевірки нормальності стохастичного процесу швидкості накопичення води на горизонті 1000 м шахти використано критерій Пірсона [86, 109, 112]. Для цього були проведені відповідні розрахунки, які представлено в табл. 2.6.

Таблиця 2.6 – Вихідна інформація щодо швидкості накопичення води в водозбірниках підземних горизонтів шахти Тернівська (м. Кривий Ріг)

№	Інтервал швидкостей	Середня швидкість	Емпіричні частоти попадання в інтервал	Ймовірність попадання в інтервал	Теоретичні частоти попадання в інтервал	Розбіжність між теоретичними і емпіричними частотами
1	2	3	4	5	6	7
1	138-145	141,5	1	0,03	3	0,98
2	145-152	148,5	2	0,06	6	2,86
3	152-159	155,5	7	0,12	12	1,87
4	159-166	162,5	15	0,17	17	0,27
5	166-173	169,5	22	0,20	20	0,26
6	173-180	176,5	21	0,18	18	0,59
7	180-187	183,5	14	0,13	13	0,17
8	187-194	190,5	11	0,07	7	2,42
9	194-201	197,5	6	0,03	3	3,05
10	201-209	205	1	0,02	2	0,50
Σ			100	1,00	100	12,98

Для застосування заданого раніше критерія Пірсона [86, 109, 112] статистичні дані за швидкістю накопичення води на підземному горизонті шахти розбито на групи, які представлено в другому стовпці. У третьому стовпці записано середини інтервалів. Згідно статистичних даних побудовано гістограму, значення якої приведено в четвертому стовпці. У п'ятому стовпці приведено розрахунки ймовірності попадання швидкості накопичення води на підземному горизонті шахти для нормального закону розподілу для середньої швидкості накопичення води $\bar{v} = 170 \text{ м}^3/\text{год}$ і середньоквадратичного відхилення $\sigma_v = 14 \text{ м}^3/\text{год}$. У шостому стовпці приведено теоретичні частоти попадання швидкості накопичення води на підземному горизонті шахти в

заданий інтервал. У цьому стовпці приведено розрахунки розбіжностей між теоретичними і емпіричними частотами згідно критерія Пірсона. Сума елементів останнього стовпця дає спостережуване значення критерія Пірсона $\chi_c^2 = 12,98$. Для числа ступенів свободи $k = 10 - 3 = 7$ і рівня значимості $\alpha = 0,05$ за таблицею стандартних значень χ^2 знайдено $\chi_{кр}^2(0,05;7) = 14,067$. Оскільки $\chi_c^2 = 12,98 < \chi_{кр}^2(0,05;7) = 14,067$, то можна стверджувати, що на довірчому рівні 0,95 має місце нормальний закон розподілу з параметрами $\bar{v} = 170$ і $\sigma_v = 14$.

На рис. 2.7 приведено графіки з дослідження статистичних даних за швидкістю накопичення води на підземному горизонті шахти.

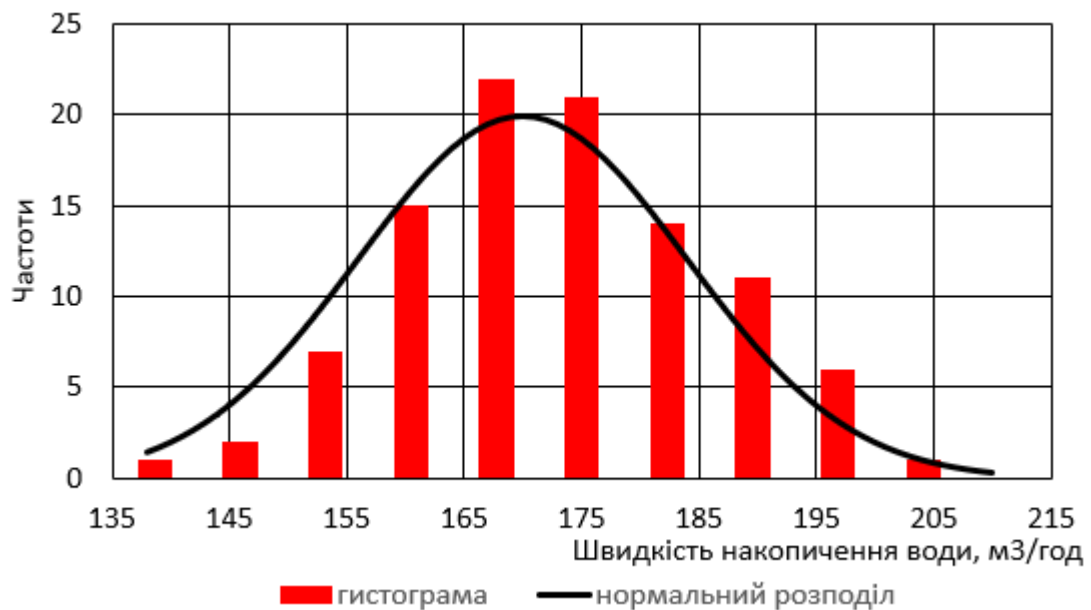


Рисунок 2.7 – Статистичні дані за швидкістю накопичення води на підземному горизонті шахти «Тернівська» (м. Кривий Ріг)

Аналіз даних, приведених на рис. 2.7, показує достатній рівень наближення гістограми до кривої нормального розподілу, що підтверджує результати, знайдені за допомогою критерія Пірсона.

Оскільки швидкість накопичення води на підземному горизонті шахти є нормальним стохастичним процесом, то формула нормальної щільності

ймовірності потужності енергозатрат на водовідлив із заданої глибини підземного горизонту шахти, згідно (2.51), (2.69) і (2.70), описується формулою:

$$f(n) = 0,0105 \cdot e^{-3,4 \cdot 10^{-4} (n-463)^2}. \quad (2.71)$$

Формула (2.71) дозволяє провести повне дослідження потужності енергозатрат на водовідлив із заданої глибини підземного горизонту шахти як стохастичного процесу.

Кореляційна функція швидкості накопичення води визначається формулою:

$$K_v(l) = \frac{1}{100-l+1} \sum_{j=0}^{100-l} (v_j - \bar{v})(v_{j+l} - \bar{v})(M^3 / \sigma \sigma d)^2, \quad (l = 0, 1, \dots, 5). \quad (2.72)$$

На рис. 2.8 представлено графіки нормованої кореляційної функції, обчисленої за формулою:

$$\tilde{K}_v(l) = \frac{K_v(l)}{D[V]} \quad (2.73)$$

і апроксимацію цієї функції формулою:

$$\tilde{K}_v^a(\tau) = e^{-\alpha|\tau|}. \quad (2.74)$$

Застосування методу найменших квадратів до ординат статистичної нормованої кореляційної функції (2.73) дозволило знайти величину параметра в формулі (2.74), який дорівнює:

$$\alpha = 0,55. \quad (2.75)$$

В результаті формула (2.74) приймає вигляд:

$$\tilde{K}_v^a(\tau) = e^{-0,55|\tau|}. \quad (2.76)$$

Аналіз розташування графіків на рис. 2.8 показує задовільне їх наближення. Для підтвердження цього висновку було обчислено індекс детермінації за формулою:

$$R^2 = 1 - \frac{S_a^2}{D[\tilde{K}_v]}, \quad (2.77)$$

$$\text{де } S_a^2 = \frac{1}{5} \sum_{l=0}^5 (\tilde{K}_v(l) - e^{-0.55l})^2.$$

Обчислення за формулою (2.77) з урахуванням чисельних результатів дало величину:

$$R^2 = 1 - \frac{0,0015}{0,1459} = 0,990. \quad (2.78)$$

Величина індексу детермінації (2.78) дозволяє стверджувати, що, згідно шкалі Чеддока, має місце вельми висока сила зв'язку між змінними [99, 104, 105].

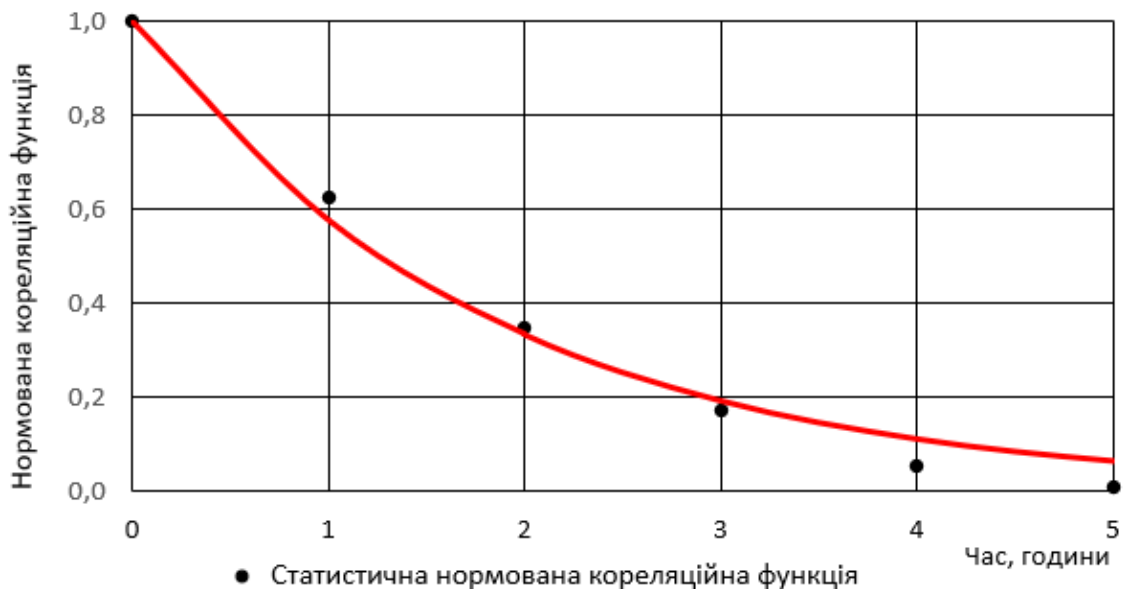


Рисунок 2.8 – Графіки статистичної нормованої кореляційної функції та її апроксимація

Враховуючи формулу (2.27), нормована кореляційна функція потужності енергозатрат на водовідлив із заданої глибини підземного горизонту шахти співпадає з нормованою кореляційною функцією швидкості накопичення води на підземному горизонти шахти, тобто, можливо скористатися відповідною апроксимацією (2.76). Таким чином, враховуючи, що дисперсія потужності енергозатрат на водовідлив із заданої глибини підземного горизонту шахти становить величину:

$$\sigma_n^2 = 1105,6, \quad (2.79)$$

кореляційна функція потужності енергозатрат на водовідлив із заданої глибини підземного горизонту шахти становить:

$$K_n^a(\tau) = 1105,6 \cdot e^{-0,55 \cdot \tau} . \quad (2.80)$$

Згідно формули (2.53) можна записати:

$$\sigma_w^2 = 334,5 . \quad (2.81)$$

Тоді, згідно (2.58), середнє число викидів в одиницю часу за межу, яка дорівнює n_0 , становить:

$$\bar{v}_{n_0} = 0,0875 \cdot e^{-4,52 \cdot 10^{-4} (n_0 - 457,47)^2} . \quad (2.82)$$

В свою чергу, згідно (2.65), середня тривалість викиду за межу, яка дорівнює n_0 , становить:

$$\bar{\tau}_{n_0} = 1,728 \cdot e^{-4,52 \cdot 10^{-4} (n_0 - 457,47)^2} (0,5 - \Phi(0,03 \cdot (n_0 - 457,47))) . \quad (2.83)$$

Якщо

$$n_0 = \bar{n} ,$$

то, згідно (2.66), середня тривалість викиду буде становити:

$$\bar{\tau}_{\bar{n}} = 1,728 .$$

Для знаходження обсягу накопиченої води на прийнятому горизонті шахти «Тернівська» в залежності від часу використано формулу (2.39):

$$\bar{u}(T) = \int_0^T \bar{v} dt = \bar{v} \cdot T = 167,94 \cdot T , \text{ м}^3 \quad (0 \leq T \leq 100) . \quad (2.84)$$

Для знаходження дисперсії обсягу накопиченої води застосовано формулу (2.34), яка, з урахуванням (2.51), приймає вигляд:

$$D[U(T)] = 2D[V] \int_0^T (T - \tau) \cdot e^{-0,55 \cdot \tau} d\tau . \quad (2.85)$$

Обчислення інтегралу в формулі (2.83) по частинах дає наступний результат:

$$\int_0^T (T - \tau) \cdot e^{-0,55 \cdot \tau} d\tau = -\frac{1}{0,55} (T - \tau) e^{-0,55 \cdot \tau} \Big|_0^T - \frac{1}{0,55} \int_0^T e^{-0,55 \cdot \tau} d\tau = \frac{T}{0,55} + (e^{-0,55 \cdot T} - 1) \quad (2.86)$$

або, після впорядкування,

$$\int_0^T (T - \tau) \cdot e^{-0,55\tau} d\tau = \frac{e^{-0,55T} + 0,55 \cdot T - 1}{0,55^2}. \quad (2.87)$$

З урахуванням (2.87), формула (2.85) прийме вигляд:

$$D[U(T)] = 985,12 \cdot (e^{-0,55T} + 0,55 \cdot T - 1), \text{ м}^6 \quad (0 \leq T \leq 100). \quad (2.88)$$

У свою чергу середньоквадратичне відхилення визначиться формулою:

$$\sigma[U(T)] = 31,39 \cdot \sqrt{e^{-0,55T} + 0,55 \cdot T - 1}, \text{ м}^3 \quad (0 \leq T \leq 100). \quad (2.89)$$

Для обчислення середніх енергозатрат на водовідлив використано формулу (2.42), яка, з урахуванням чисельних величин параметрів, прийме вигляд:

$$\bar{a}(T) = 456,8 \cdot T, \text{ кВт}\cdot\text{год}, \quad (0 \leq T \leq 100) \quad (2.90)$$

Дисперсія енергозатрат на водовідлив знаходиться за формулою (2.43), яка, з урахуванням чисельних величин параметрів, прийме вигляд:

$$D[A(T)] = 7288,34 \cdot (e^{-0,55T} + 0,55 \cdot T - 1) (\text{кВт}\cdot\text{год})^2, \quad (0 \leq T \leq 100). \quad (2.91)$$

В свою чергу, середньоквадратичне відхилення енергозатрат на водовідлив визначиться формулою:

$$\sigma[A(T)] = 85,37 \cdot \sqrt{e^{-0,55T} + 0,55 \cdot T - 1} \text{ кВт}\cdot\text{год}, \quad (0 \leq T \leq 100). \quad (2.92)$$

Якщо швидкість накопичення води на підземному горизонті шахти є нормальним стохастичним процесом, то обсяг накопичення води на підземному горизонті шахти за визначений час описується формулою нормальної щільності ймовірності у вигляді:

$$f(u(T)) = \frac{0,013}{\sqrt{e^{-0,55T} + 0,55 \cdot T - 1}} e^{-\frac{5,1 \cdot 10^{-4} (u - 167,94 \cdot T)^2}{e^{-0,55T} + 0,55 \cdot T - 1}}. \quad (2.93)$$

В свою чергу, формула нормальної щільності обсягу енергозатрат на водовідлив із заданої глибини підземного горизонту шахти за визначений час описується формулою:

$$f(a(T)) = \frac{4,67 \cdot 10^{-3}}{\sqrt{e^{-0,55 \cdot T} + 0,55 \cdot T - 1}} e^{\frac{6,9 \cdot 10^{-5} (a-456,8 \cdot T)^2}{e^{-0,55 \cdot T} + 0,55 \cdot T - 1}}. \quad (2.94)$$

Формули (2.71), (2.93) і (2.94) дозволяють провести дослідження енергозатрат на водовідлив, обсягів накопичення води на підземному горизонті шахти та енергозатрат на цей процес із заданої глибини підземного горизонту шахти за визначений час як процесу стохастичного характеру.

Дослідження водовідливу в вище згаданому форматі дозволило шляхом використання статистичного матеріалу за швидкістю накопичення води на прикладі реально діючого підземного горизонту шахти «Тернівська» (м. Кривий Ріг) побудувати математичну модель.

Синтезована модель дозволяє визначити такі стохастичні характеристики процесу водовідливу як середні і дисперсії потужності енергозатрат на водовідлив, обсяги накопичення води на підземному горизонті шахти та енергозатрати на водовідлив із заданої глибини підземного горизонту за визначений час. Більш того, якщо ординати швидкості накопичення води на підземному горизонті шахти мають нормальний закон розподілу, тобто, відома щільність її розподілу, то нормальний закон розподілу мають і здобути по моделі потужності енергозатрат на водовідлив, обсяги накопичення води на підземному горизонті шахти та енергозатрати на водовідлив із заданої глибини підземного горизонту шахти за визначений час, тобто, вони повністю характеризуються як випадкові величини.

Таким чином, здобуті результати дозволяють характеризувати водовідлив не тільки за середніми величинами, як це робилось раніше і робиться зараз, але й за дисперсіями, тобто, за їх розкидом. Якщо відомо, що ординати швидкості накопичення води на підземному горизонті шахти мають нормальний закон розподілу, то можливо повністю характеризувати водовідлив як стохастичний процес.

Та все ж, як буде доведено в подальшому, даний етап, як вагома і необхідна опція, даючи важливі «стартові» позиції для кінцевого варіанту

досліджень – розробки СК ГВК, потребує свого подальшого логістичного розвитку, в тому числі з дотриманням ряду нормативних документів [112, 113]. Це віддзеркалюється з результатів моделювання, які резюмують, що керування за критерієм споживання ЕЕ в годинах доби, як однокритеріальний варіант, даючи певні дивіденди в енергетиці ГВК, все ж не є достатньо ефективним і потребує подальшого пошуку рішень і форми синергетичного багатокритеріального формату прийняття управлінських рішень системою керування з використанням базового енергетичного фактору – керованої роботи електромеханічних систем ГВК із максимальним використанням їх енергетичного потенціалу та можливістю регулювання режимами роботи всього агрегативного комплексу ГВК згідно з його визначеною стохастичністю функціонування.

2.4 Висновки до розділу 2

1. Математичне моделювання режимів постачання-споживання електричної енергії головним водовідливним комплексом залізорудних шахт як стохастичного процесу дозволяє визначити комплекс електроенергетичних характеристик, які пов'язані з маючим місце фактом випадковості протікання цього процесу.

2. Параметри процесу відведення вод із підземних горизонтів шахт, які будувались попередніми пошукачами виключно на отриманих з експериментальних досліджень середніх значень величин, значно доповнилися отриманими новими параметрами, які характеризують їх розкид. Більш того, при врахуванні особливостей процесу водовідливу, що визначається нормальним законом розподілу ординат швидкості накопичення води на підземному горизонті шахти, можливе отримання повної характеристики енергозатрат на цей процес, обсягів накопичення води на підземному горизонті шахти і енергозатрат на водовідведення з заданої глибини конкретного підземного горизонту шахти за визначений час як випадкового процесу.

3. Сформована модель визначає електроенерговитрати $N(t)$ (кВт), які використано на відкачування води з підземних горизонтів шахти в залежності від швидкості накопичення води $V(t)$ (м/год) в момент часу t і глибини підземного горизонту h (м), з якого відкачується вода.

4. Розроблено і запропоновано для практичного використання методику дослідження відведення підземних вод як стохастичного процесу являє собою етап – стартову позицію в оцінюванні варіанту однокритеріального керування процесом водовідведення і водночас диктує необхідність доповнення критеріїв для прийняття системоутворюючих управлінських дій згідно алгоритму багатокритеріального керування з кінцевою метою пошуку та розробки відповідної системи керування.

РОЗДІЛ 3

ВИЗНАЧЕННЯ БАЗОВИХ СКЛАДОВИХ ФОРМАЦІЇ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОГО КЕРУВАННЯ ПАРАМЕТРАМИ ФУНКЦІОНУВАННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ ГОЛОВНИХ ВОДОВІДЛИВНИХ КОМПЛЕКСІВ ЗАЛІЗОРУДНИХ ШАХТ

3.1 Вступні посилання на бачення ефективності застосування технічних засобів підвищення енергоефективності головних водовідливних комплексів

У попередніх розділах даного дослідження було розглянуто та обґрунтовано комплекс основних напрямків підвищення енергоефективності ГВК згідно специфіки їх функціонування в електроенергетичних структурах залізорудних шахт.

У процесі форматизації, з певним рівнем превентивності, комплексу ГВК у напрямку підвищення електроенергоефективності споживання ЕЕ вимальовуються два, тривіальних за тактикою досягнення, шляхи: оптимізація режимів функціонування електромеханічних систем насосних комплексів як в локальних, так і в агрегативних формах роботи ГВК та керування технологією роботи водовідливу в цілому, згідно його технологічних параметрів і погодинних тарифів на ЕЕ (рис. 3.1). В ідеалі ці обидва спрямування повинні реалізовуватись спільно в єдиній структурі СК і саме в такому форматі може бути досягнуто максимальний ефект [143, 144].

Перша складова такого рішення, в свою чергу, може вирішуватись шляхом заміни експлуатованого обладнання електромеханічних систем ГВК на нові з можливістю адаптивного керування параметрами їх роботи або модернізацію існуючих ЕМС із можливістю відповідного функціонування, про яке зазначено попередю. Однак, перший найбільш привабливий із зазначених напрямків, оскільки маловірогідний у сучасній економічній ситуації вітчизняних гірничих підприємств. Тому, на даному етапі дослідження аналізується і вибудовується другий із вищезазначених шляхів.



Рисунок 3.1 – Алгоритм функціональної структури системи керування головними водовідливними комплексами залізорудної шахти

Як відомо, експлуатовані в складі ЕМС ГVK насоси мають низький і, що суттєвіше, нелінійний ККД [114, 115], (Додаток Е). Привідні асинхронні двигуни цих насосів мають нелінійний ККД, який залежить від рівнів їх навантаження. Параметри гідросистеми ГVK також неоднозначні. При такому варіанті логічно, як базову структуру для подальшої розбудови СК, вибрати процес енергоефективного керування, перш за все, електромеханічними системами насосних агрегатів.

Як правило, в складі агрегатів ГVK на окремих підземних горизонтах – модулях загальної структури водовідведення вітчизняних залізрудних шахт, встановлюється до 6-8 насосів (Додаток Г). В активній фазі роботи, знову таки як правило, одночасно знаходиться 2-3 насоси. Інші або в «гарячому», або в «холодному» резерві. Агрегативні сегменти ГVK різних горизонтів згідно існуючих схем водовідведення конкретної шахти (шахт) з'єднуються між собою двома-трьома паралельними вітками трубопроводів (ставами) (Додаток Г). Зрозуміло, що залучення різної кількості насосів на різну

кількість паралельних віток трубопроводів без адаптивного керування цим процесом призведе до різних значень гідравлічних опорів, а значить до різних режимів роботи гідросистеми і, що основне, до енергетично неефективних [116-120]. Звідси, у першому наближенні, випливає висновок, що керування режимами роботи (перемикання числа паралельно діючих насосів на різну кількість паралельних віток трубопроводів) може забезпечити певний рівень економії електроенергії в ГВК. В основному цього можна досягти за рахунок максимального наближення робочих точок ККД електродвигунів і насосів до їх максимальних паспортно-нормативних, тобто до енергоефективних значень [120-121].

Для підтвердження і оцінювання рівня відповідності цього ствердження проведемо моделювання для умов реалій функціонування ЕМС ГВК, здійснимо перевірку цієї ідеї шляхом моделювання на конкретному прикладі діючих параметрів структури відведення підземних вод у шахті «Криворізька» (м. Кривий Ріг), як підземного підприємства з видобутку ЗР в Україні з найбільшим добовим водоприпливом.

3.2 Дослідження стартового варіанту розбудови структури енергоефективного керування режимами функціонування водовідливних комплексів

Згідно формату генерального спрямування даного дослідження логістика в розбудові СК ГВК в авторському баченні виглядає наступним чином:

- аналіз електроенергетичних параметрів функціонування електромеханічних систем як локальних, так і групових електроприводів ГВК;
- вибір схеми застосування систем плавного регулювання частоти обертів привідних електродвигунів насосів;
- вибір алгоритму енергоефективного керування індивідуальним і груповим агрегативним електроприводом ГВК;

– розробка узагальненого алгоритму відповідної підпрограми функціонування ГВК як стартового варіанту загальної структури керування водовідведенням – СК електропостачання-електроспоживання підземного гірничорудного підприємства.

У свою чергу, вже в «рамочному» оцінюванні, процес розбудови такого комплексу навіть у стартовому варіанті як підсистеми (не говорячи вже про систему в цілому) не простий у прогнозі і в технічному баченні з очікуванням довгострокового в часі терміну реалізації.

При обґрунтуванні й виборі шляхів до досягнення мети треба чітко оцінювати та усвідомлювати, що термін подолання цих шляхів у часі не повинен перетинати межі, коли весь очікуваний результат поглине інфляція.

Та все ж, як зазначалось попереду, ЕМС насосних агрегатів ГВК у сьогоденні являють собою модульні агрегативні багатодвигунові комплекси на базі асинхронних електродвигунів із відсутністю регулювання частоти їх обертів і полегшеного пуску. Саме електромеханічні комплекси (електроприводи) в енергоефективному спрямуванні розбудови алгоритмів керування ними залишаються значним потенціалом для отримання позитивних рішень у перфектній економіці електроенергетики аналізованих споживачів ЕЕ [114, 117, 120]. У розрізі такого рішення обов'язковою логістичною необхідністю очікуваних комплексних рішень у структурі розбудови СК первинною стартовою ланкою повинна бути наявність енергоефективних регуляторів частоти обертів привідних електродвигунів водяних насосів із реально досяжним рівнем і можливістю енергоефективного адаптивного керування режимами їх функціонування згідно узагальненого алгоритму реалізації цього спрямування.

У реаліях сьогодення вибір виду енергоефективного перетворювача напруги живлення для регулювання частоти обертів привідних АД водяних насосів із метою керування режимами функціонування як ЕМС окремих технологічних модулів, так і агрегатів ГВК у цілому, не являє собою складну наукову задачу, а, тим паче, наукову проблему. Проблема лежить у площині

вибору і оптимізації індивідуальних параметрів їх локального функціонування в агрегативному комплексі згідно критеріїв енергоефективності всього багатомодульного електромеханічного комплексу ГВК.

Логістичним рішенням у цьому процесі, в тому числі для оцінювання в достатньому обсязі очікуваних і бажаних режимів функціонування ЕМС насосних агрегатів ГВК із метою розбудови відповідного алгоритму керування цим комплексом, є проведення аналітичних досліджень із наступною перевіркою на відповідних моделях або в реаліях функціонування ГВК. Останній варіант у плані його виконання маловірогідний, тому аналізувати будемо на основі перших із вищенаведених спрямувань.

3.3 Розробка імітаційної моделі для дослідження параметрів і режимів роботи головних водовідливних комплексів

Першим кроком у меті розбудови імітаційної моделі функціонування ГВК для визначення енергоефективних режимів і параметрів роботи їх агрегатів є необхідність автоматичного їх визначення з подальшим керуванням цими процесами. Існують певні методики розрахунків статичних режимів гідросистем із трубопроводами [115, 122]. Задля виключення громіздких гідростатичних розрахунків і автоматизації цього процесу автором розглядалась можливість використання математичних пакетів типу *Maple*, *Mathcad* та інших, але робочі зошити вказаних пакетів мають невелику наочність. Тому був обраний математичний пакет *Matlab*, який дозволяє будувати більш наочні математичні моделі, а також, крім статичних, досліджувати й динамічні режими (при деяких припущеннях).

У процесі моделювання за вхідні дані приймалися існуючі схеми і електромеханічне обладнання ГВК діючих вітчизняних залізрудних шахт, які працюють із відповідною кількістю насосних агрегатів, розташованих на відповідних підземних горизонтах (Додаток Г).

У процесі розбудови дослідницької моделі враховувались можливість і вірогідність використання різної кількості насосів на різну кількість

паралельних віток трубопроводів, що приводить до відповідних варіацій режимів роботи гідросистеми, у тому числі і до енергетично неефективних.

Припустимо, і, це відповідає реаліям, що керування режимами роботи насосних агрегатів ГВК (переключення паралельно діючих насосів на різну кількість паралельних віток трубопроводу) може забезпечити економію електроенергії. У значній мірі цього ефекту можна досягти шляхом максимального наближення робочих точок ККД привідних АД і насосних агрегатів у цілому до їх максимальних – паспортно-номінальних значень (Додаток Е).

Це можливо досягти за допомогою застосування регульованого електроприводу – електромеханічної системи насосних агрегатів. Для цього доцільно залучити перетворювачі частоти напруги живлення привідних АД. Водночас зазначимо, як позитив такого рішення, не дивлячись на те, що насоси теоретично можуть працювати з досить широким діапазоном продуктивності, допустимий діапазон їх ефективної роботи значно звужений до певних меж, обумовлених заводом-виробником. Це спрощує алгоритм необхідного функціонування ПЧ. Наприклад, для насоса типу ЦНС 300-600 цей діапазон лежить у межах 220-360 м³/год (Додаток Е). З метою оцінювання реальних режимів і виявлення потенціалу ефективності роботи насосів підйому води з підземних горизонтів діючої схеми водовідведення конкретної шахти розроблена детальна схема моделювання в програмному пакеті *Matlab* (рис. 3.2).

Модель сформовано з двох підсистем – власне насосної станції (агрегату) та її управляючої структури. Ядро моделі складають: накопичувач води – *Водозбірник 500 м (Tank 1)*, який разом із насосною станцією знаходиться на цьому ж горизонті, три паралельних стави (трубопроводи), які з'єднують колектор насосної станції з умовним накопичувачем води на поверхні шахти, *Водозбірник на поверхні (Tank 2)* (як відомо, цей накопичувач знаходиться на поверхні або може бути відсутнім).

Усі останні блоки моделі забезпечують вимірювальні та інші допоміжні функції.

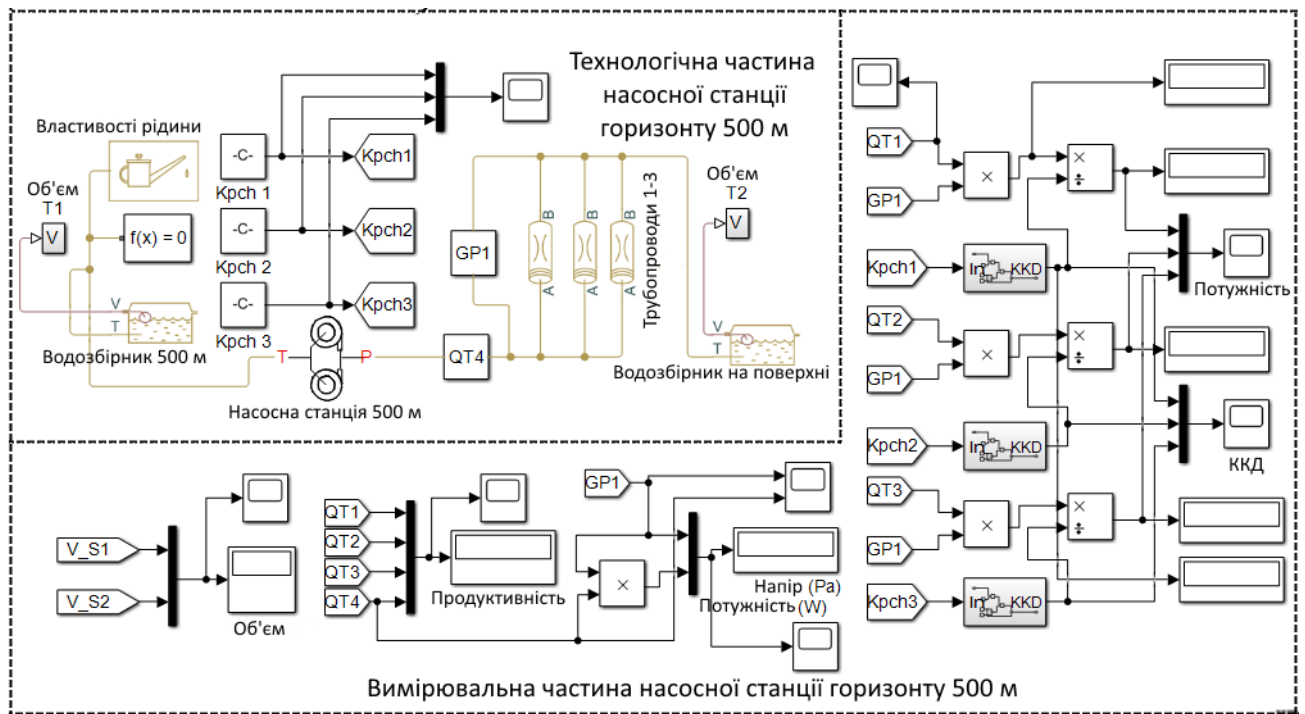


Рисунок 3.2 – Модель дослідження енергетичних режимів роботи насосів
головних водовідливних комплексів

(горизонт 500 м шахти «Криворізька», м. Кривий Ріг)

Блок *Властивості рідини (Water Properties)* задає параметри води (щільність, температуру, в'язкість рідини).

У блоці $f(x)=0$ задаються параметри розрахунку моделі (крок інтегрування, метод інтегрування, похибки округлення тощо).

Блоки QT – датчики витрат, QP – датчики тиску.

Блоки *Об'єм (Volume (m³))*, *Продуктивність (Flow (m³)/s)* та *Напір (Pressure (Pa))*, *Потужність (Power (W))* – багатоканальні цифрові вимірювальні прилади, які вимірюють відповідно два канали об'єму води (для кожного накопичувача *Водозбірник 500 м* і *Водозбірник на поверхні (Tank 1 – Tank 2)*), чотири канали витрати води (витрати окремо через кожний насос і сумарну витрату), два канали вимірювання (тиску на підйомному водопроводі від *Водозбірник 500 м (Tank 1)* до *Водозбірник на поверхні (Tank 2)* та потужності для перекачування води на вказаному водопроводі).

Блоки *V* біля водозбірників здійснюють вимірювання поточного об'єму води у водозбірниках.

Права частина моделі складається з трьох ідентичних каналів вимірювання потужності і поточного ККД (для кожного з трьох насосів окремо).

ККД насосів при цьому змінюється при зміні сигналів керування згідно формули Муді [139]:

$$\eta_1 = 1 - \frac{1 - \eta_2}{\left(\frac{n_1}{n_2}\right)^{0.36}},$$

де n_2 – початкова швидкість обертання насоса;

η_2 – ККД насоса.

Результат вимірювання потужностей як з урахуванням ККД насоса, так і без нього, здійснюється в цифровому вигляді та у виді графіків.

У моделі реалізована можливість роздільного керування перетворювачами частоти трьох насосів (які знаходяться в підсистемі насосної станції *Pump Station 500 m*). Сигнали керування ($Kpch1 \div Kpch3$) ПЧ змінюються в діапазоні $0 \div 1$, що відповідає діапазону зміни швидкості привідних електродвигунів від 0 до 1470 об/хв.

Блок *Насосна станція 500 м (Pump Station 500 m)* представлено на рис. 3.3.

Через те, що за умовами технологічного процесу постійно задіяні тільки 2-3 насоси, в моделі насосної станції прийнято 3 насоси, останні 3-4 насоси знаходяться в «гарячому» або «холодному» резерві і не розглядаються.

Зворотні клапани *Зворотній клапан 1* \div *Зворотній клапан 3 (Check Valve 1* \div *Check Valve 3)* відіграють важливу роль. Елементарні моделі накопичувачів води *Водозбірник 500 м* і *Водозбірник на поверхні (Tank 1* та *Tank 2)* поєднані вертикально розташованими трубопроводами та реалізовані як сполучені посудини. Тому, підйом накопичувача *Водозбірник на поверхні*

(*Tank 2*) на висоту 500 м автоматично приведе (при зупинці усіх насосів) до витоку води з нього в нижче розташований накопичувач *Водозбірник 500 м (Tank 1)*. У діючих шахтах вода наливається в ємності зверху. Тому, в моделі зворотні клапани, як тільки насоси при регулюванні їх швидкості обертання стають нездатними підняти воду на 500 м, відсікають зворотну течію води.

У розрізі технології дослідження за допомогою моделювання перевіriamo збалансованість підйому води з вище зазначеного підземного горизонту тієї ж шахти. Досліджено роботу трьох паралельно працюючих насосів блока *Насосна станція 500 м (Pump Station 500 m)* на три трубопроводні стави при номінальних умовах роботи без регулювання швидкості в різних режимах роботи. Виконавши моделювання, отримано наведені в табл. 3.1 результати.

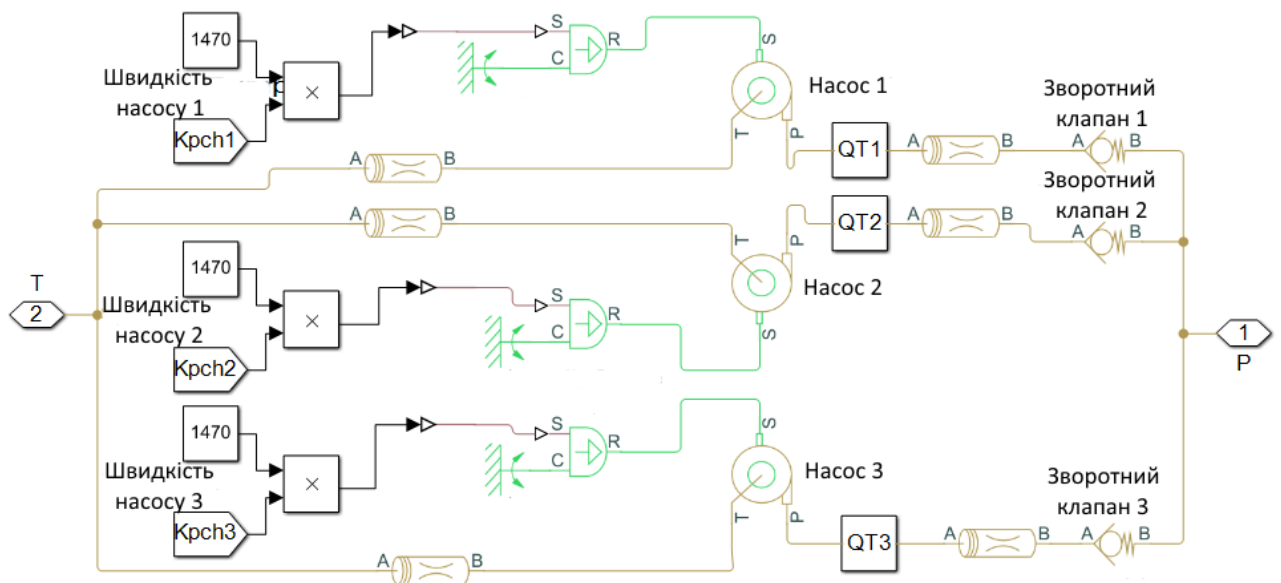


Рисунок 3.3 – Модель блоку *Насосна станція 500 м (Pump Station 500 m)* головного водовідливного комплексу підземного горизонту 500 м (шахта «Криворізька», м. Кривий Ріг) в програмі *Matlab*

Таблиця 3.1 – Результати моделювання роботи головного водовідливного комплексу при номінальних умовах роботи без регулювання швидкості

Режим роботи	Витрата 1-го насоса, м ³ /год	Витрата 2-го насоса, м ³ /год	Витрата 3-го насоса, м ³ /год	Потужність споживання 1-м насосом, Вт	Потужність споживання 2-м насосом, Вт	Потужність споживання 3-м насосом, Вт	Сумарна витрата, м ³ /год
1 насос на 1 став	0,09678	-7,288·10 ⁻¹¹	-7,288·10 ⁻¹¹	691400	0	0	0,09678
1 насос на 2 стави	0,09729	-7,275·10 ⁻¹¹	-7,275·10 ⁻¹¹	692300	0	0	0,09729
1 насос на 3 стави	0,09738	-7,272·10 ⁻¹¹	-7,272·10 ⁻¹¹	692500	0	0	0,09738
2 насоси на 1 став	0,09483	0,09483	-7,337·10 ⁻¹¹	687500	687500	0	0,18966
2 насоси на 2 стави	0,09678	0,09678	-7,288·10 ⁻¹¹	691400	691400	0	0,19356
2 насоси на 3 стави	0,09715	0,09715	-7,278·10 ⁻¹²	692100	692100	0	0,1943
3 насоси на 1 став	0,09182	0,09182	0,09182	680100	680100	680100	0,27546

Продовження таблиці 3.1

3 насо- си на 2 стави	0,09595	0,09595	0,09595	689800	689800	689800	0,28785
3 насо- си на 3 стави	0,09677	0,09677	0,09677	691400	691400	691400	0,29073

З результатів моделювання, наведених в табл. 3.1, встановлено:

- гідросистему аналізованої шахти спроектовано якісно – усі насосні агрегати в будь-якому сполученні працюють у припустимому діапазоні;
- значних змін режимів гідросистеми при вмиканні різної кількості насосних агрегатів на різну кількість ставів не відбувається – витрата води кожним насосом змінюється при цьому максимум на 5,7 %, а споживана одним насосом потужність – максимум на 1,8 %;
- при роботі одного, двох або трьох насосних агрегатів на різну кількість трубопроводів величини витрат води змінюються відповідно на 0,6 %, 2,4 % і 5,5 %. Це незначні показники для того, щоб враховувати їх у процесі формування алгоритму функціонування СК ГВК.

3.4 Дослідження функціональної динаміки електромеханічних систем насосних агрегатів головних водовідливних комплексів залізорудної шахти

Використаємо імітаційну модель рис. 3.2 для дослідження динаміки ГВК на прикладі аналізованих умов горизонту 500 м. Припустимо, що сигнали керування ПЧ змінюються так, як показано на рис. 3.4.

Для першого сигналу керування збільшено коефіцієнт частоти з 0,84 до 1,0 (42 – 50 Гц), для другого сигналу зменшено сигнал частоти з 0,9 до 0,84 (45 – 42 Гц), для третього сигналу збільшено коефіцієнт від 0,6 до 1,0 (30 – 50 Гц)

і відразу зменшено його від 1,0 до 0,5 (50 – 25 Гц). Такі сигнали керування ПЧ насосів приведуть до зміни їх продуктивності (рис. 3.5).

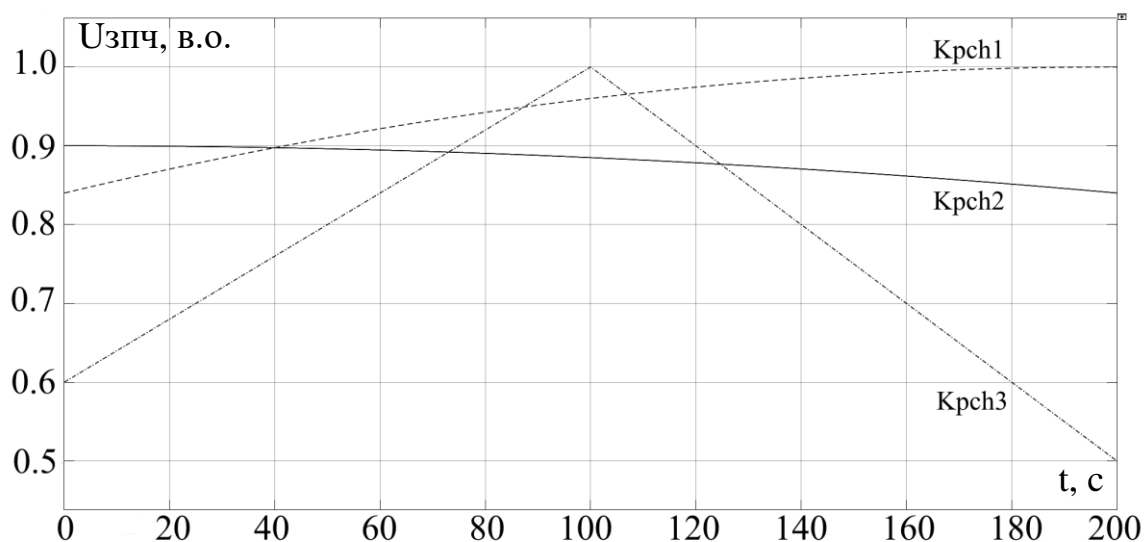


Рисунок 3.4 – Траєкторія змін сигналів керування перетворювачем частоти напруги живлення привідних двигунів насосних агрегатів

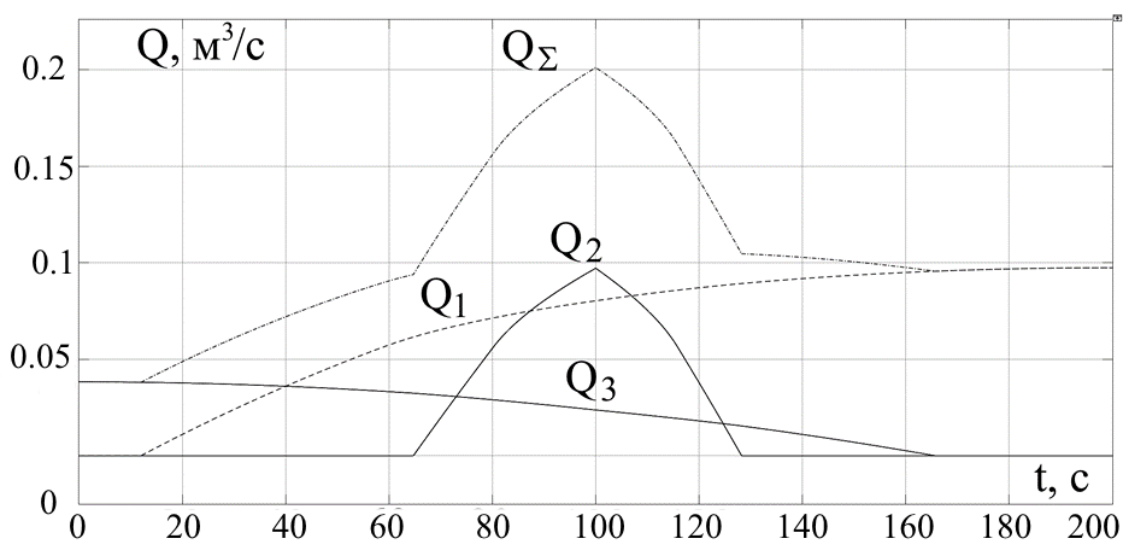


Рисунок 3.5 – Продуктивність окремих водяних насосів та їх сумарна продуктивність у структурі головних водовідливних комплексів залізорудних шахт

З рис. 3.5 видно, що продуктивність для кожного з насосів змінюється нелінійно: перший насос вмикається на подачу води в момент часу ≈ 12 с (при

43 Гц), другий насос вимикається в момент часу ≈ 166 с (при 43 Гц), третій насос послідовно вмикається в момент часу ≈ 65 с (при 43 Гц), а потім вимикається в момент часу 128 с (також при 43 Гц). При частоті живлення привідних електродвигунів насосів більше 43 Гц здійснюється подача води наверх, а якщо частота живлення насосів падає нижче 43 Гц, то тиск, який розвивається насосами, нездатний подолати тиск водяного стовпу і насос зупиняється як технологічний механізм, продовжуючи працювати «на упор».

ККД насосів при зміні сигналів керування змінюється згідно формули Муді (рис. 3.6).

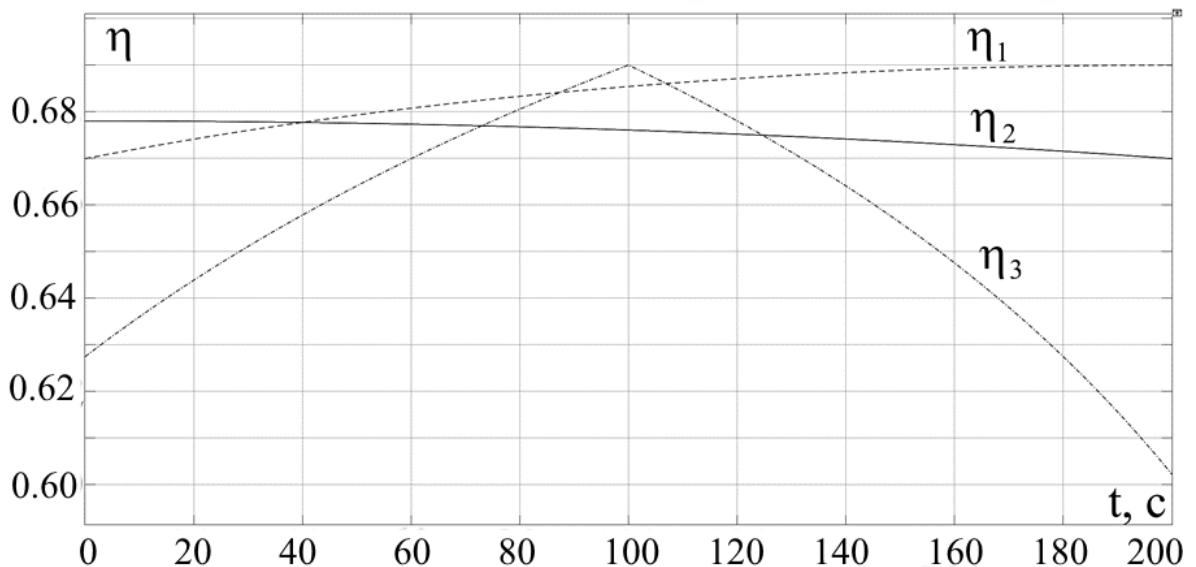


Рисунок 3.6 – Коефіцієнт корисної дії насосів при різних сигналах керування перетворювачем частоти напругою живлення привідних двигунів

На рис. 3.7 наведено графіки напору води в ставах і сумарної продуктивності насосів. З графіків видно, що сумарна продуктивність насосних агрегатів змінюється в значному діапазоні від $0,04$ м³/с до $0,2$ м³/с (на 80 %), при цьому напір води в ставах змінюється в меншому діапазоні від 4904 кПа до 4916 кПа (на 0,2 %). Очевидно, як тільки воду припинять подавати усі три насоси, то напір у ставі буде дорівнювати тиску стовпа нерухомої води.

На рис. 3.8 наведено проєкцію споживання насосами потужності, в якій враховано ККД насосів.

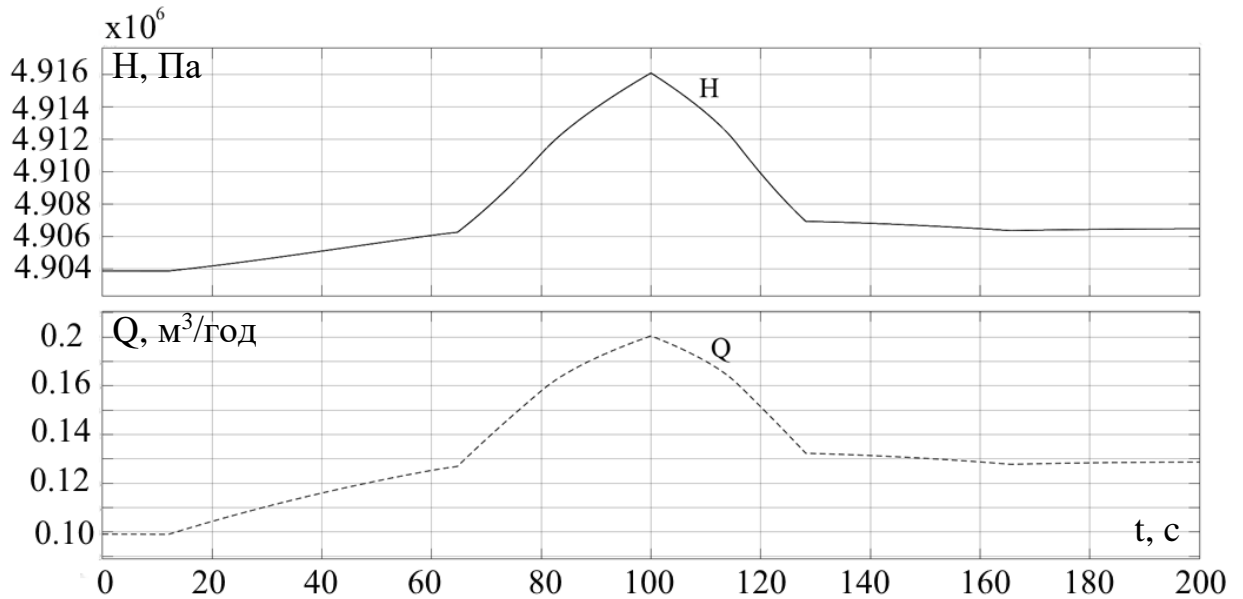


Рисунок 3.7 – Напір у ставах і сумарний обсяг транспортованої води з підземних горизонтів на поверхню

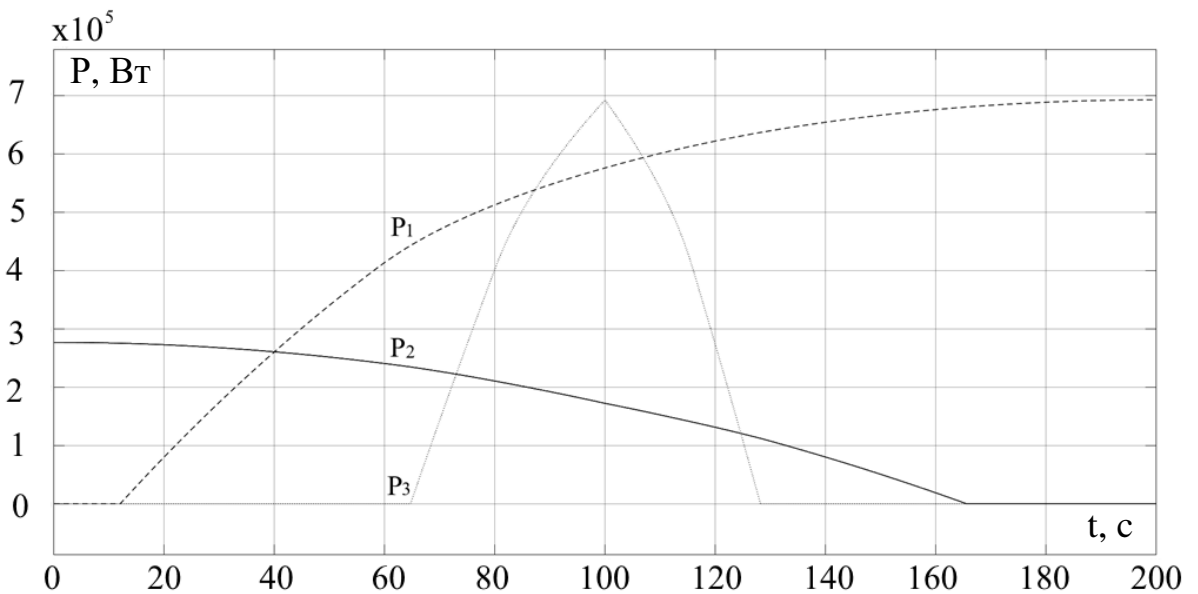


Рисунок 3.8 – Споживана електрична потужність насосів головних водовідливних комплексів

З рис. 3.8 видно, що активна потужність насосів змінюється від 0 до максимального значення, різного для кожного з насосів. Величина потужності працюючого насоса дорівнює нулю, це є природно, тому що в цей період здійснюється робота з відкачування підземних вод на поверхню.

Для достатньої варіативності проведемо оцінювання залежності споживаної електричної потужності одного насосного агрегату від його продуктивності. Встановимо сигнал завдання ПЧ так, як показано на рис. 3.9 (лінійна зміна).

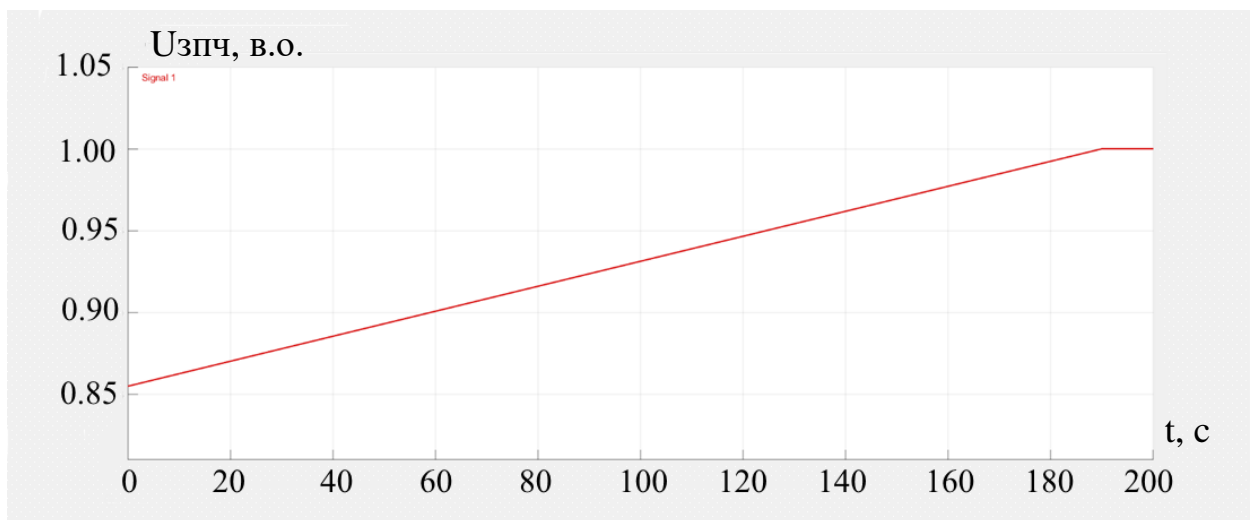


Рисунок 3.9 – Сигнал завдання одиночного перетворювача частоти напруги живлення двигунів водяних насосних агрегатів (діапазон 43-50 Гц)

У діапазоні зміни частоти 43-50 Гц активна споживана насосом потужність змінюється в діапазоні від 0 до 691,5 кВт (рис. 3.10) і продуктивність насоса змінюється від 0 до 0,097 м³/с (рис. 3.11).

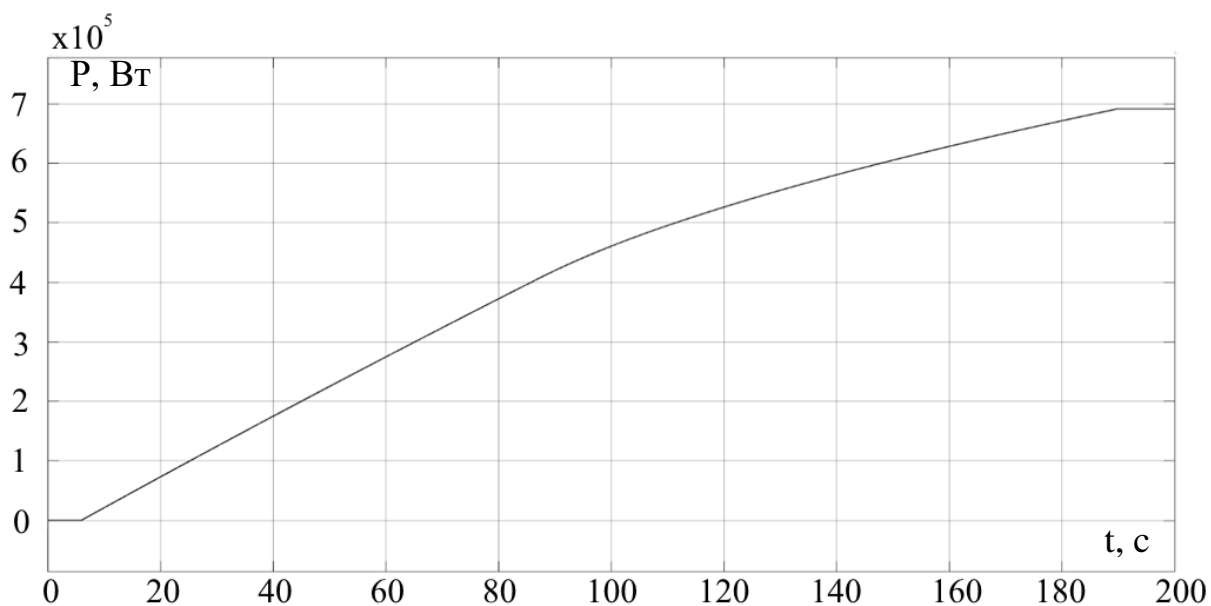


Рисунок 3.10 – Активна споживана насосним агрегатом потужність при зміні діапазону частот 43-50 Гц перетворювача частоти напруги живлення привідного електродвигуна

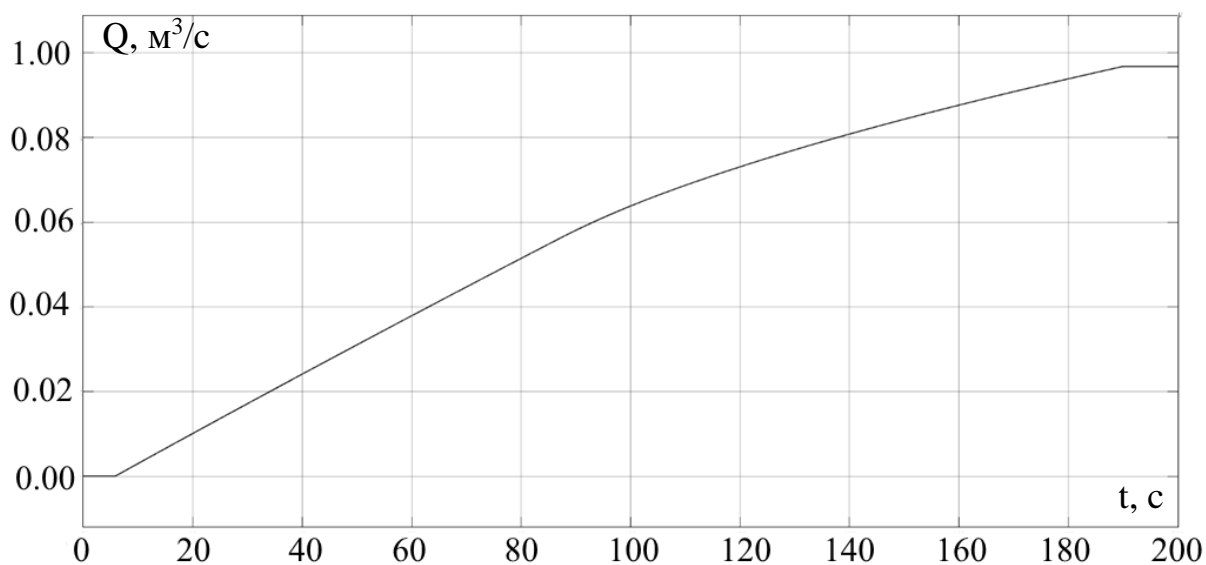


Рисунок 3.11 – Продуктивність насосного агрегата при зміні частоти 43 – 50 Гц перетворювача частоти напруги живлення привідного електродвигуна

На рис. 3.12 побудовано залежність споживаної потужності насосним агрегатом від продуктивності.

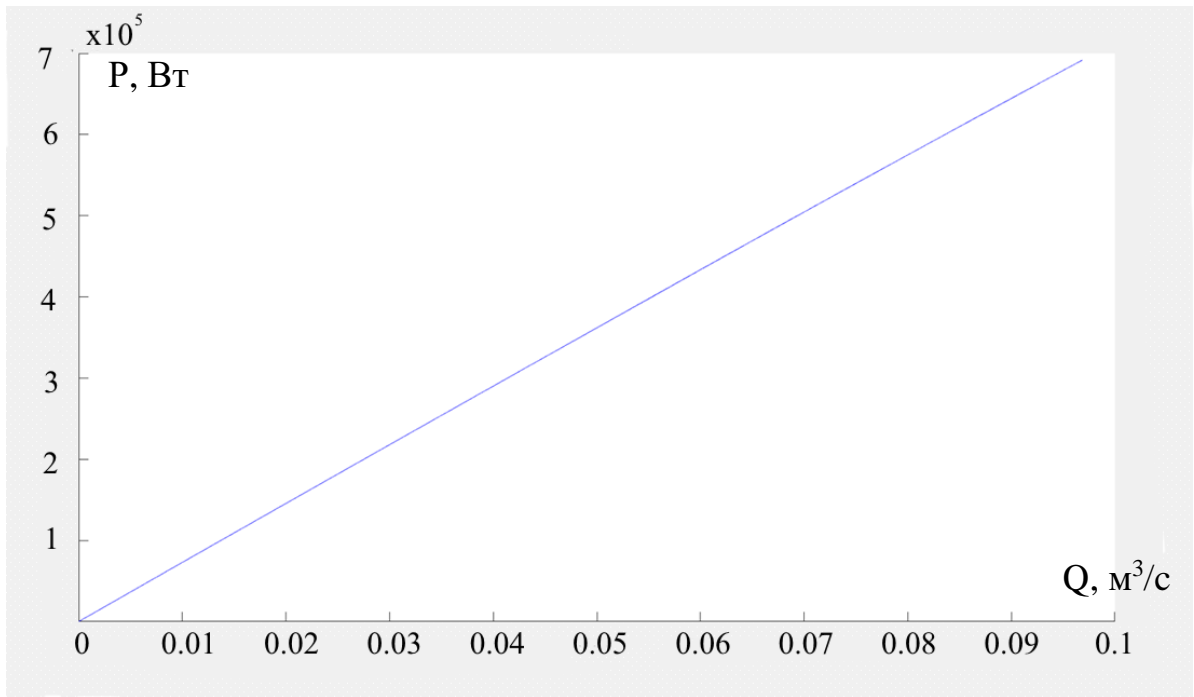


Рисунок 3.12 – Залежність споживаної потужності насосного агрегата від його продуктивності

З отриманих залежностей видно, що, не зважаючи на нелінійність $Q-H$ характеристики насосів, залежність споживаної потужності від витрати – лінійна, тобто, будь-який насос цього типу можна характеризувати за допомогою коефіцієнта $7128,9 \text{ кВт/м}^3/\text{с}$. Зазначений коефіцієнт може стати в нагоді як необхідна константа для побудови математичного забезпечення системи автоматичного керування режимами роботи насосів.

3.5 Оцінювання впливу втрат електроенергії в привідних двигунах насосних агрегатів на енергобаланс головних водовідливних комплексів

Оцінимо вплив електричних втрат привідних двигунів насосних агрегатів на загальні витрати енергії ГВК. У насосній станції горизонту 500 м загальної схеми ГВК аналізованої шахти використовуються високовольтні АД потужністю 800 кВт із синхронною швидкістю 1500 об/хв (Додаток Е). Прийmemo для подальших досліджень експлуатований у складі насосних агрегатів ГВК двигун А-13-46-4 із параметрами:

$$P_H = 800 \text{ кВт}; U_H = 6 \text{ кВ}; n_H = 1485 \text{ об/хв}; s_H = 1 \%; \eta_H = 94 \%; \cos\varphi_H = 0,91;$$

$$I_H/I_N = 6,4; M_H/M_N = 1,0; M_{\max}/M_H = 2,1; J = 200 \text{ кг}\cdot\text{м}^2.$$

На жаль, у технічній літературі для вказаного типу двигуна, як і для багатьох інших, відсутні базові параметри схеми заміщення, необхідні для розрахунку статичних та динамічних характеристик. Тому визначено їх розрахунково-експериментальним шляхом. За допомогою багатоваріантних досліджень, здійснених згідно моделі рис. 3.13, визначені параметри схеми заміщення:

- активний опір фази статора 0,8946 Ом;
- індуктивність фази статора 0,01456 Гн;
- зведений активний опір ротора 1,152 Ом;
- зведена індуктивність фази ротора 0,01456 Гн;
- взаємоддуктивність 0,57582 Гн.

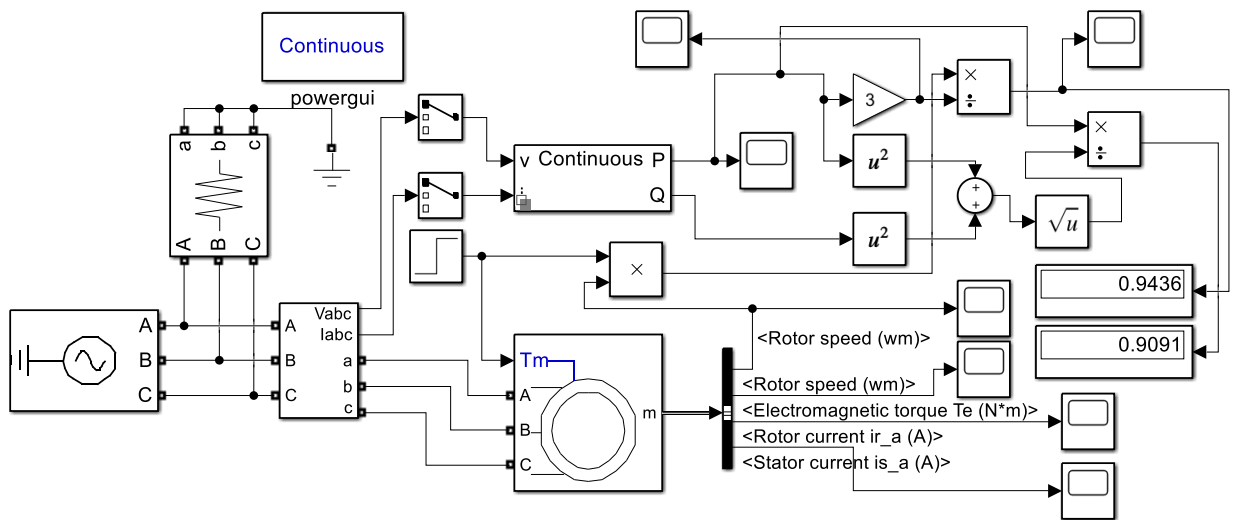


Рисунок 3.13 – Модель привідного асинхронного двигуна насосного агрегата з вимірювальними колами ККД і $\cos\varphi$

У процесі досліджень змодельовано прямий пуск АД із відповідними параметрами схеми заміщення і отримано графіки перехідних процесів, за якими перевірено відповідність паспортним даним двигуна типу А-13-46-4 (рис. 3.14 – 3.16).

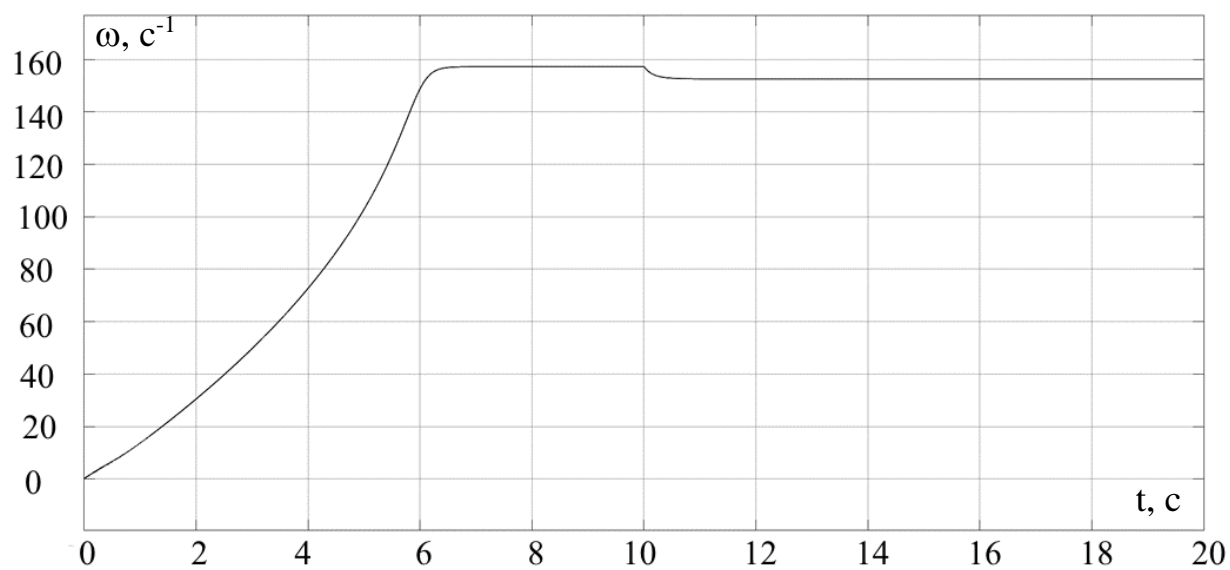


Рисунок 3.14 – Зміна частоти обертів привідного асинхронного двигуна насосного агрегата при прямому пуску

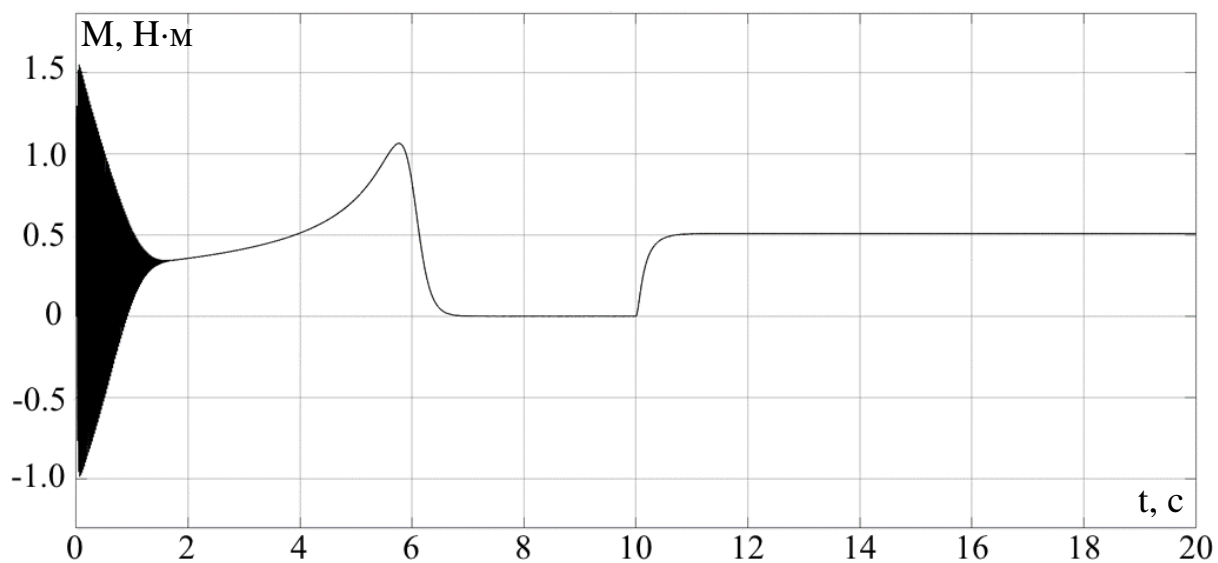


Рисунок 3.15 – Динаміка зміни електромагнітного моменту привідного асинхронного двигуна насосного агрегата при прямому пуску

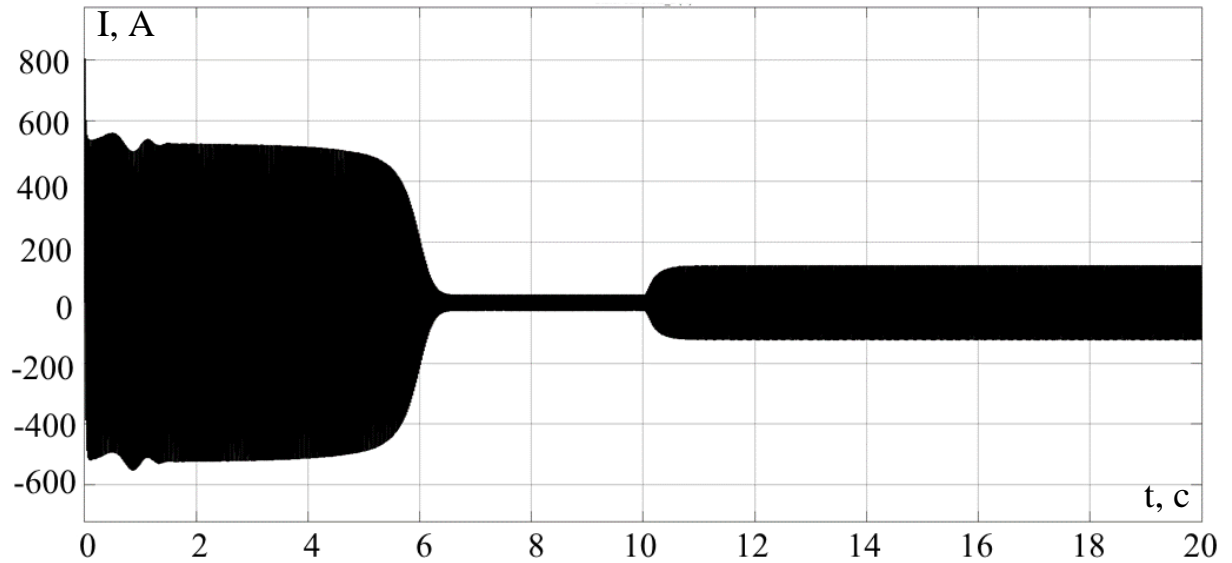


Рисунок 3.16 – Динаміка зміни струму фази статора привідного асинхронного двигуна насосного агрегата при прямому пуску

З графіка електромагнітного моменту (рис. 3.15) видно, що відношення величини максимального (критичного) моменту до величини номінального моменту відповідає паспортному значенню $M_{\max}/M_H = 2,1$.

Номінальний струм (рис. 3.16) відповідає номінальному паспортному значенню:

$$I_H = \frac{P_H}{3 \cdot U_{\phi H} \cdot \cos \varphi_H \cdot \eta_H} = \frac{800000}{3 \cdot 3464 \cdot 0,91 \cdot 0,94} = 89,99 \text{ А,}$$

амплітудне значення струму:

$$I_{\text{НАМПЛ}} = I_H \cdot \sqrt{2} = 89,99 \cdot \sqrt{2} = 127,3 \text{ А.}$$

Отриманий результат свідчить про рівність сталих значень номінального струму.

Перевантажувальна здатність за струмом менше 4,5 із графіка струму проти $I_{\text{п}}/I_H = 6,4$. Це пояснюється тим, що в моделі *Matlab* асинхронного двигуна (згідно математичного опису) не враховано вплив скін-ефекту при його прямому пуску. Номінальні ККД і коефіцієнт потужності при моделюванні досягнули величин, практично ідентичних паспортним (ККД

дорівнює 0,9436 в порівнянні з номінальним 0,94; коефіцієнт потужності дорівнює 0,9091 в порівнянні з номінальним 0,91). Звідси випливає, що параметри схеми заміщення визначені із задовільною точністю.

На основі дослідницької моделі (рис. 3.13) визначено залежність ККД від навантаження для досліджуваного АД типу А-13-46-4 (табл. 3.2, рис. 3.17).

Таблиця 3.2 – Залежності $\eta = f(m)$

$m = M/M_n$, в.о.	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
ККД, в.о.	0,9359	0,9622	0,9769	0,9735	0,9733	0,9683	0,9653
$m = M/M_n$, в.о.	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3
ККД, в.о.	0,9611	0,9556	0,9505	0,9436	0,9383	0,9322	0,9255

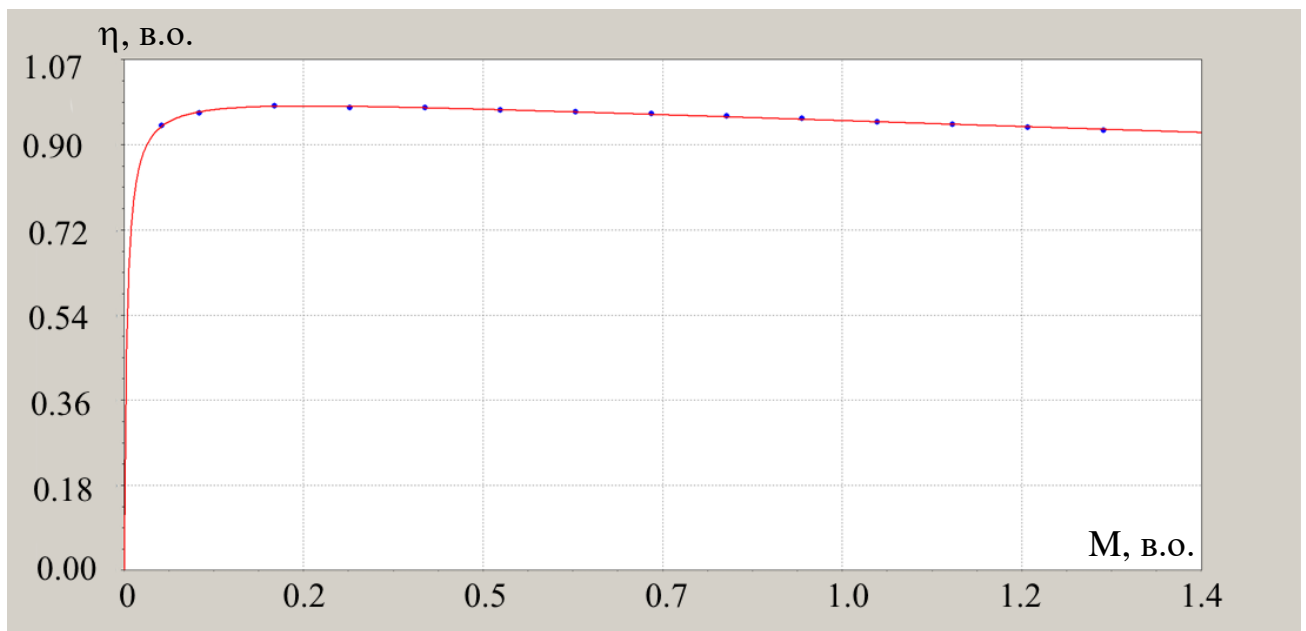


Рисунок 3.17 – Залежність ККД від відносного навантаження на валу привідного асинхронного електродвигуна насосного агрегата

Вираз для апроксимації має наступний вигляд:

$$\eta(m) = \frac{-0,0000028995 + 273,132 \cdot m}{1 + 271,393 \cdot m + 17,073 \cdot m^2}. \quad (3.1)$$

З рис. 3.17 видно, що ККД при номінальному навантаженні складає мінімальну величину і при зниженні навантаження зростає, тобто, можна

вважати, що для асинхронного двигуна типу А-13-46-4 ККД практично не змінюється та дорівнює 0,9683 (для середнього навантаження на валу двигуна). Таким чином додаткові втрати двигуна становлять:

$$\Delta P_{ED} = \left(\frac{1}{\eta} - 1 \right) \cdot P_H = \left(\frac{1}{0,9683} - 1 \right) \cdot 800 = 26,19 \text{ кВт}$$

3.6 Оцінювання рівнів меж енергоефективного керування потужністю, споживаною насосними агрегатами за допомогою перетворювачів частоти напруги живлення привідних двигунів

На практиці для введення насоса в номінальний режим функціонування налаштовують відповідний гідравлічний опір за допомогою неповного закриття засувки. Насьогодні такий спосіб є нераціональним і не є енергоефективним.

Якщо задати мінімальну припустиму витрату води 0,061 м³/с за допомогою регулювання швидкості насосів горизонту 500 м (що буде можливо, якщо задати $K_{pch} = 0,927$), то потужність, споживана насосом, складе 443600 Вт, що буде на 35 % менше, ніж при роботі того ж насоса з витратою води 0,1 м³/с.

Тобто, якщо в попередньому варіанті (без ПЧ) була можливість практично дискретного перемикання витоків насосної станції 500 м з інтервалом приблизно 0,1 м³/с (0; 0,1; 0,2 і 0,3 м³/с) з дискретним перемиканням потужностей споживання з інтервалом приблизно 692 кВт, то з використанням перетворювачів частоти ми маємо більш гнучкі діапазони змінювання споживаної потужності:

$$443,6 \leftrightarrow 692; 1135,6 \leftrightarrow 1384; 1827,6 \leftrightarrow 2076 \text{ кВт.}$$

Як бачимо, залишаються так звані «сліпі зони» регулювання споживаною потужністю насосної станції з 692 до 1135,6 кВт, і з 1384 до 1827,6 кВт.

Необхідно врахувати, що енергетична ефективність роботи насосів на різних частотах обертання ротора суттєво змінюється.

Якщо насос працює з максимальною продуктивністю, то витрата енергії на перекачування 1 м³/с води протягом години складе:

$$E_1 = \frac{P_1}{Q_1} = \frac{692}{0,1} = 6920 \text{ кВт} \cdot \text{с/м}^3.$$

Якщо насос працює з мінімальною продуктивністю 0,061 м³/с, то витрата енергії на перекачування 1 м³/с води протягом години буде іншою:

$$E_2 = \frac{P_2}{Q_2} = \frac{443,6}{0,061} = 7272 \text{ кВт} \cdot \text{с/м}^3.$$

Видно, що регулювання швидкості обертання коліс насосного агрегата до максимального значення не тільки дозволяє зменшувати споживання енергії насосом, але робить процес перекачування води менш енергоефективним.

3.7 Оцінювання рівнів енергоефективності електромеханічних систем водяних насосних агрегатів головних водовідливів у процесі їх вмикання-вимикання

Процес вмикання-вимикання насосних агрегатів являє собою складову технології функціонування ГВК залізородних шахт. Цей процес може бути як «штатним», тобто, запланованим, так і позаштатним – незапланованим, а по факту – аварійним чи псевдоаварійним. В останні роки цей процес поширився в часі і, перш за все, штучним методом – тимчасовими паузами в роботі ГВК у неекономічні щодо тарифів на ЕЕ годинах доби. «Плюси» і «мінуси» від такого псевдоефективного заходу оцінено в ряді робіт як із позитивного, так і негативного боків. Та все ж, оскільки це, як зазначено попередю, сегменти роботи ГВК, а, значить, і сегменти енергоефективності їх функціонування, проаналізуємо цей процес на електроенергетику насосних агрегатів та відповідні параметри складових цих комплексів і, зокрема, на приводні двигуни.

Відомо, що пуск АД із високоінерційними механізмами на їх валу, якими є водяні насоси ГВК, є важким процесом для приводних двигунів через

перегрівання обмоток статора, що приводить або може привести до прискореного старіння ізоляції провідників обмотки і пазової ізоляції з подальшою перспективою дострокового виходу двигуна з ладу через «пробої» ізоляції. Перегрівання стрижнів пускової обмотки ротора приводить до нерівномірного нагріву усєї конструкції, отже, до її деформації з порушенням електричних контактів стрижнів зі сполучними кільцями.

У конструкції АД є обмотки статора і стрижні білячої клітки ротора. Оцінемо можливість нагрівання обмотки статора АД до температур вище номінальних, а стрижнів – до температур деформації клітки при пуску АД насосного агрегата.

Для цього дослідження використаємо модель рис. 3.12. Відомо, що момент інерції двигуна складає $200 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$, момент інерції насоса – невідомий, повна маса насоса складає 2470 кг , насос багатокаскадний, кількість каскадів (коліс насоса) – 5 шт.

Припустимо, в рамках реалій, що момент інерції коліс насоса складає $50 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$. Тоді сумарний момент інерції складе $250 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ (порівняно з двигуном більший у 1,25 рази), що цілком узгоджується з більшістю пар системи «двигун – механізм». Враховуємо також, що пуск приводу насоса зазвичай здійснюють на закриту засувку, при цьому момент опору на валу приводу визначається виключно механічним тертям у насосному агрегаті і втратами на переміщенні рідини в корпусі насоса. Прийmemo, що на валу момент опору буде складати 10 % від номінального.

За допомогою вказаної моделі (рис. 3.12) визначено, що, по-перше, час прямого пуску збільшується до 9,5 с, по-друге, сумарна кількість витраченої енергії на пуск агрегата становить 11,16 МДж.

Оцінемо енергію, яка була безпосередньо витрачена власне на розгін агрегата до сталого стану. Після розгону кінетична енергія агрегата складе:

$$E_K = \frac{J \cdot \omega^2}{2} = \frac{250 \cdot 157^2}{2} = 3,08 \text{ МДж.}$$

Витрати енергії на формування магнітного поля асинхронного двигуна не враховуються тому, що вказана енергія має відношення не до активної потужності, а до реактивної.

Тобто, різниця між сумарною пусковою активною енергією і кінетичною енергією розігнаного агрегата, буде виключно тепловою енергією, яка поступить в асинхронний двигун за 8 секунд:

$$E_{ТЕПЛ} = E_{\Sigma} - E_K = 11,16 - 3,08 = 8,08 \text{ МДж.}$$

Вказана тепла енергія формується виключно за рахунок протікання струмів статора по його обмоткам і струмів ротора, які проходять по стрижням білячої клітки. Оцінемо на скільки підніметься температура в обмотках і стрижнях. Припустимо, що при пуску тепла енергія розподіляється рівними частинами між статором і ротором:

$$8,08/2 = 4,04 \text{ МДж.}$$

Використаємо відому з фізики рівність теплового балансу для суцільних тіл:

$$Q = c \cdot m \cdot (T_2 - T_1),$$

де Q – кількість теплоти (енергії), яка була передана тілу (Дж);

c – теплоємність тіла;

m – маса тіла;

T_2, T_1 – температури відповідно після нагрівання і перед нагріванням.

Питома теплоємність міді статорних обмоток складає 0,385 кДж/(кг·К), а теплоємність алюмінію білячої клітки – 0,897 кДж/(кг·К). Прийmemo початкову температуру двигуна перед пуском 25 °С.

У середньому постійна часу нагріву провідників складає 30 хв., тому можна вважати, що тепло, сформоване в провідниках за 9,5 с пуску АД, не почне виходити за межі двигуна в навколишнє середовище. Тобто, практично вся тепла енергія спочатку буде сконцентрована виключно в міді обмоток статора і алюмінії клітки. Щоб визначити температури провідників, треба знати активні маси міді і алюмінію:

$$T_2 = \frac{Q}{c_{Al} \cdot m_{Al}} + T_1 - \text{для алюмінію};$$

$$T_2 = \frac{Q}{c_{Cu} \cdot m_{Cu}} + T_1 - \text{для міді}.$$

Нажаль, активні маси міді і алюмінію АД невідомі та визнаються примітивними методами зі значними рівнями вірогідності. Для мінімізації вищезгаданих негативів можливим вбачається застосування відомого тривіального заходу до вирішення цієї задачі.

Але спочатку трохи аналізу. Припустимо, що двигун при пуску нагріється до 155 °С (припустима температура для класу ізоляції *F*). Для цього потрібно, щоб міді було 80 кг, алюмінію – 34,7 кг. На перший погляд для асинхронного двигуна масою 3910 кг це замалі цифри. Але у будь-якому випадку з високою долею ймовірності можна вважати, що саме двигун типу А-13-46-4 з насосом типу ЦНС 300-600 не буде перегрітий за час одного прямого пуску. Але повторний пуск або пуск із вихідного «гарячого» стану вже буде неприпустимий тому, що двигун нагріється до величини 155°С+130°С = 285 °С. Враховуючі, що постійні часу охолодження досить великі, то з температури 285 °С двигун може охолоджуватися до температури 155 °С, що викликає незворотні пошкодження в ізоляції статорної обмотки. Відомо, що постійний перегрів обмоток двигуна на кожні 10 °С призведе до скорочення його терміну служби в 2 рази.

Тому, проєктована система керування режимами роботи ГВК повинна базуватись на правильному виборі потужності двигуна для можливості повторного підключення після факту відключення гідросистеми.

У цьому варіанті найліпшим буде здійснення полегшеного пуску насосних агрегатів, що можна реалізувати за допомогою тих же ПЧ. Це дозволить будь-який насосний агрегат включати в роботу необмежену кількість разів. Таким чином, можливості і доцільність застосування ПЧ розширюються і, що головне, робить їх головним модератором процесу

енергоефективного керування всім комплексом ГВК у будь-якому форматі розбудови системи керування.

3.8 Обґрунтування базової структури формату стартового варіанта системи керування режимами роботи головного водовідливного комплексу залізорудної шахти

У попередніх розділах даного дослідження і в Додатках Є наведено результати стану й оцінювання перспектив ряду заходів щодо підвищення електроенергоефективності функціонування ГВК залізорудних шахт. Аналізуючи перспективи в цьому спрямуванні зрозуміло, що єдиним достатньо ефективним рішенням буде створення відповідної СК режимами роботи як електромеханічних систем насосних агрегатів, так і режимами всієї ГВК із зміною технології їх роботи. Превентивно формуючи логістику розбудови системи керування роботою ГВК шахт, необхідно розуміти, що вкрай енергозатратні агрегативні комплекси в структурі гідросистем – це відцентрові насоси, що експлуатуються. Останні є загальноновизнаними структурованими механізмами з низьким ККД, що разом зі значними одиничними величинами потужності дають значні витрати енергії при перекачуванні будь-яких рідин. Проте, питання заміни відцентрових насосів на більш енергоефективні типи в силу низки причин поки що не стоїть.

Власне будь-яка гідросистема, в тому числі така технологічно складна як ГВК шахт, є системою з жорсткою структурою і конфігурацією. Тут на увазі мається те, що через практичну неможливість стиску води будь-які зміни у будь-якій точці гідросистеми моментально позначиться на режимі роботи усієї гідросистеми, тобто система – високочутлива.

З іншого боку, режим роботи гідросистеми природно може і буде з часом змінюватися в гіршу сторону без втручання людини, тому що колеса насосів поступово зношуються, шорсткість внутрішніх поверхонь труб у силу абразивного впливу не зовсім чистої води також може змінюватися; в деяких колінах трубопроводів із понад грубими стиками можуть виникати

замулювання, які трохи змінюють місцеві опори руху рідини. Це все буде змінювати параметри сталого режиму функціонування ГВК як гідросистеми.

Взагалі-то, усі ці моменти враховуються при проектуванні. Проеєтувальники намагаються узгодити номінальні параметри насосів із параметрами номінального режиму гідромережі таким чином, щоб робоча точка насоса знаходилася в припустимому діапазоні, який вказано заводом-виготовлювачем на характеристиках насоса. Але не завжди це можливо тому, що, наприклад, у минулому, а де-не-де і в теперішньому часі, приходиться узгоджувати режим роботи насосів зі змінним режимом роботи мережі водовідведення шахти.

Щоб уникнути зайвих витрат енергії при налаштуванні режиму роботи гідросистеми, а також щоб забезпечити більш-менш точне регулювання об'ємів відкачування води, для керування режимами роботи привідних АД відцентрових насосів – агрегатів ГВК ставлять ПЧ.

ПЧ, якщо є потреба в глибокому регулюванні відкачування води, здійснюють свою пряму задачу – змінюють швидкість обертів коліс відцентрових насосів. У попередньому розділі даного дослідження було доведено, яку економію електроенергії можна отримати усього лише при невеличкому підналаштуванні робочої точки на номінальній характеристиці роботи насоса. З іншого боку, ПЧ також доцільно використовувати як пуско-розгінні пристрої насосних агрегатів, коли здійснюється підключення одного насоса в систему; далі ПЧ перемикається на пуск або регулювання двигуна наступного насоса і т. д. Така галузь їх застосування також значно поліпшує техніко-економічні показники використання обладнання. По-перше, з практики виключаються гідроудари в системі, по-друге, виключаються одіозні за своїми наслідками прямі пуски АД.

Але в світлі комплексного висвітлення проблеми використання одиничних (із метою економії первинних капітальних вкладень) ПЧ виключно для полегшення пускових режимів насосних агрегатів представляється лише половиною ідеї.

Якщо проаналізувати вид статичних характеристик насосів типу ЦНС (Додаток Е), то видно, що в межах припустимого діапазону продуктивності 220 – 360 м³/год. на номінальній швидкості робочого колеса значно змінюється ККД (від 62% до 70 %) і корисна потужність перекачування рідини (сотні кВт, діапазон тим більше, чим вище напір). Зрозуміло, що зміщуючи робочу точку насоса всередині припустимого діапазону продуктивності, ми, цим самим, можемо змінювати споживання енергії електродвигуном насоса. Те саме можна сказати і про зміщення робочої точки на характеристиці ККД привідного АД насоса [119] (Додаток Е).

Вочевидь, постійна зміна параметрів гідросистеми (повільна в силу природних причин, що наведені вище, і швидка в силу добових коливань водоприпливу в шахті) приводить до необхідності використання системи керування водовідливом. Як відомо, будь яка СК технологічним процесом передбачає використання датчиків і регуляторів параметрів технологічного процесу. У даному випадку основною задачею водовідливу є відкачування води в функції рівня водоприпливу з мінімумом споживання ЕЕ і сплати за неї. Сигналами зворотних зав'язків, враховуючи існуючі схеми ГВК, є:

- поточні рівні води в проміжних водозбірниках;
- поточна інтенсивність заповнення водозбірників різних горизонтів;
- поточна продуктивність роботи кожного з насосних агрегатів.

Останній параметр також слід контролювати, виходячи з випадку, що швидкість колеса насоса може бути знижена настільки, що утворений напір може стати недостатнім для того, щоб подолати опір багатометрового стовпа води, і вода просто не буде подаватись наверх, тобто, буде здійснюватися робота насоса на «упор». Маючи всі ці параметри, можливим вбачається прагнення якомога більшого зниження потужності електродвигуна N_2 , приймаючи при цьому обмеження, пов'язані з граничною ємністю водозбірників, й інтенсивністю їх заповнення.

Розбудований згідно вищенаведених аргументів стартовий формат структури керування ГВК наведено на рис. 3.18.

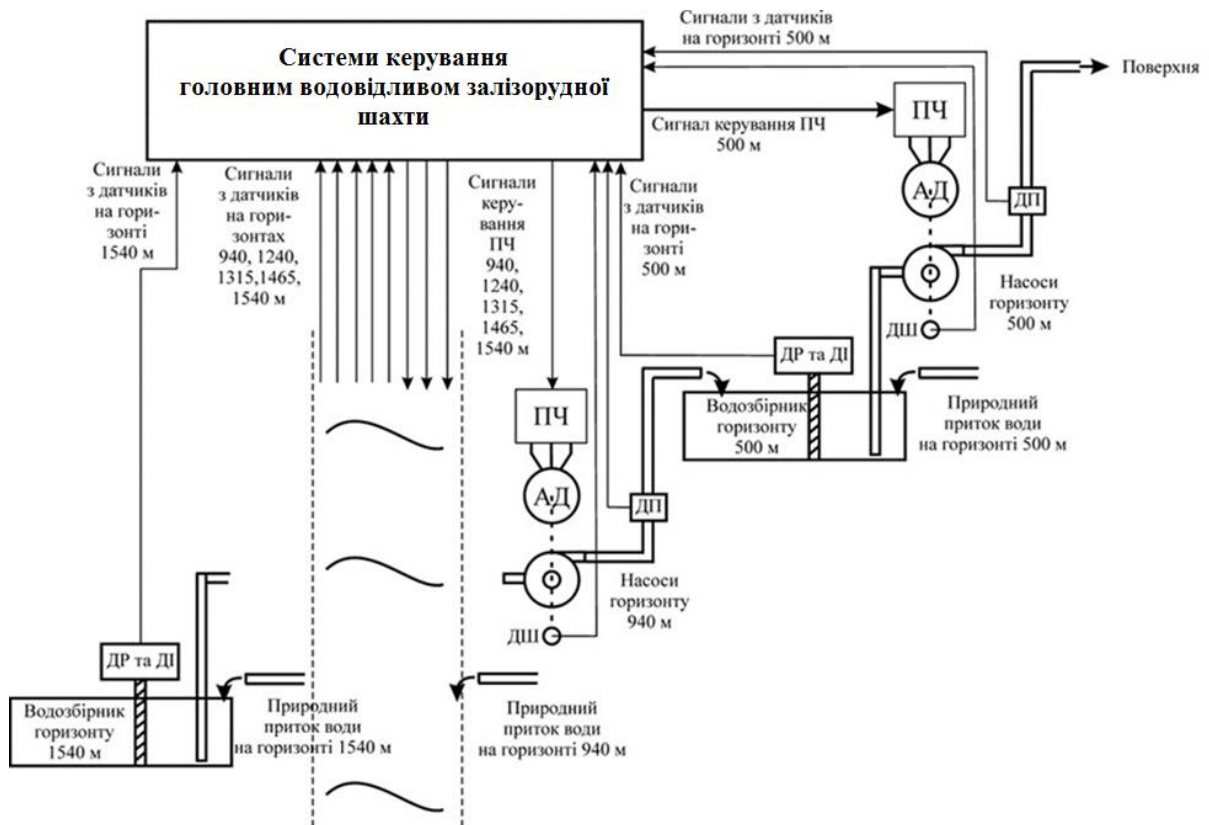


Рисунок 3.18 – Стартовий формат структури системи керування головним водовідливним комплексом шахти: ДР – датчик рівня, ДІ – датчик інтенсивності (підйому рівня води), ДШ – датчик швидкості ротора насоса, ДП – датчик продуктивності, ПЧ – перетворювач частоти, АД – асинхронний двигун

На рис. 3.19 наведено фрагмент структури алгоритму керування ГВК, завдяки якому повинно здійснюватись завдання оптимізації електроенергоспоживання насосними агрегатами ГВК за умови підтримки всіх системоутворюючих параметрів головного водовідливу на оптимально досяжному рівні.

Пілотний варіант (рис. 3.19), як і алгоритм функціонування ГВК, в контексті даного дослідження розглядається як базовий сегмент для подальшої розбудови формату загальної архітектури системи керування роботою ГВК, яка, в свою чергу, може бути складовою багатоієрархічної СК

електропостачання-електроспоживання підземного залізрудного підприємства [126, 135, 142]. Тому в структурній схемі алгоритму крім сигналів із датчиків, які мають безпосереднє відношення до ГВК, потрібно також постійно «опитувати» сигнал керування з більш вищого рівня відповідної СК.

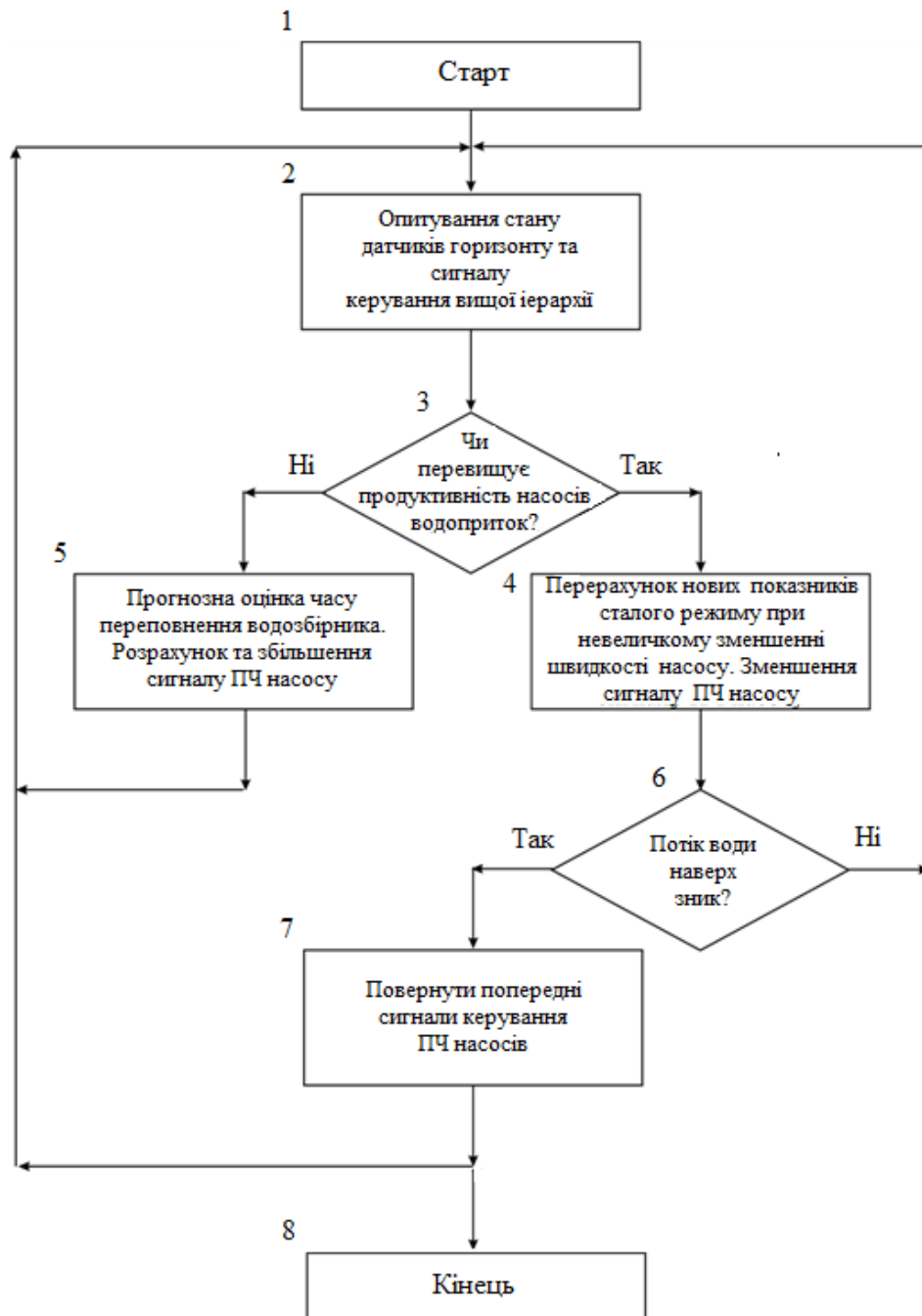


Рисунок 3.19 – Структура блок-схеми превентивного алгоритму керування функціонування водовідливним комплексом шахти

Якщо при опитуванні датчиків з'ясовується, що водозбірник (водозбірники) горизонтів мають низький рівень і заповнюється досить повільно, то з'являється можливість зменшити інтенсивність відкачування води. Але щоб уникнути будь-яких несподіванок необхідно здійснювати прогнозні розрахунки на предмет того, чи не переповниться водозбірник ближчим часом і коли це може відбуватись. При сприятливому прогнозі здійснюється корекція сигналу керування роботою насоса.

Також повинна контролюватись безперервність потоку води вверх (це може відбутися, коли напір води стає нижчим гранично припустимого і його не вистачить для подолання висоти стовпа до верхнього водозбірника). Якщо потік переривається, то повертається попереднє значення сигналу керування насосом. Якщо продуктивність насосів стає занадто малою порівняно з припливом води в водозбірник і розрахунки показують, що існує небезпека переповнення водозбірника, то сигнал керування ПЧ формується таким чином, щоб прискорити відкачування води з водозбірника. Але для додаткової економії електроенергії приріст швидкості насоса треба здійснювати з урахуванням прогнозу заповнюваності водозбірника. Не варто поспішати відкачувати воду наверх, якщо є вірогідність того, що приплив води може зменшитися, що дозволить знову зменшити споживану потужність.

Але у будь-якому випадку в результаті розрахунків завжди повинна бути можливість форсувати процес відкачування води з водозбірника з урахуванням ймовірнісних пікових величин припливу води.

3.9 Висновки до розділу 3

1. Дослідження існуючих і потенційно досяжних параметрів функціонування електромеханічних систем насосних агрегатів – складових головних водовідливних комплексів залізородних шахт свідчать, що:

– коефіцієнт корисної дії привідного двигуна насосного агрегата сягає свого максимуму при відносному навантаженні на валу 0,1 в.о. ($\eta_{\max} = 0,9622$) і знижується при подальшому збільшенні навантаження на валу (досягаючи

$\eta_{\max} = 0,9436$ при номінальному навантаженні); втрати в двигуні змінюються від 31,4 кВт до 47,8 кВт і можуть прийматися практично постійними при частоті живлення 50 Гц;

– надії на значні позитивні зміни режиму гідросистеми при вмиканні різної кількості насосних агрегатів на різну кількість ставів виявилися марними – витрата води кожним насосом змінюється при цьому максимум на 5,7 %, а споживана одиничним насосом потужність – максимум на 1,8 %; при роботі одного, двох або трьох насосів на різну кількість трубопроводів величини витрати води змінюються в діапазоні відповідно 0,6 %, 2,4 % і 5,5 % (це незначні показники для того, щоб враховувати їх у подальшій автоматизації ГВК).

2. Стартовим спрямуванням для розбудови узагальненого формату процесу підвищення енергоефективності залізорудних шахт – зменшенням рівнів сплати за спожиту електроенергію головними водовідливними комплексами є забезпечення функціонування електромеханічних систем насосних агрегатів в енергоефективних (паспортних) режимах згідно енергопотенціалу їх електромеханічних параметрів і логістики розбудови керування режимами їх роботи згідно погодинних добових тарифів за спожиту електроенергію.

3. Базовим варіантом на шляху підвищення техніко-економічних показників шахтного водовідливу є використання перетворювачів частоти напруги живлення в складі їх електромеханічних комплексів із переведенням їх у статус регульованих об'єктів – електроприводів. Така можливість з'являється завдяки вдалому поєднанню двох моментів: позитивному нахилу характеристики споживання активної потужності асинхронних двигунів і негативному нахилу $Q-H$ характеристики насосів. При цьому треба враховувати, що енергетична ефективність перекачування води знижується при зниженні швидкості обертів колеса насоса: чим нижче швидкість колеса, тим гірше поточна енергоефективність перекачування.

4. Незважаючи на те, що система відведення підземних вод залізорудних шахт на денну поверхню функціонує з стохастичним рівнем водоприпливів, використання регульованого електроприводу навіть при відносно невеликих коливаннях водоприпливу дасть значний економічний ефект. Додатковою технічною перевагою в цьому спрямуванні є незначна величина необхідного діапазону регулювання.

Для повного (паспортного) регулювання продуктивності насосів від 0 до максимального значення вистачає мінімального діапазону регулювання вихідної частоти перетворювачів – практично від 40 Гц до 50 Гц. При цьому треба звернути увагу на те, що залежність споживаної потужності насоса від його продуктивності – величина постійна.

При зупинці відкачування води витрата електроенергії залишається мінімальною і дорівнює витраті електроенергії при холостому ході насоса типу АМ-300-600 з асинхронним привідним двигуном – агрегатів типового складового головних водовідливних комплексів залізорудних шахт, а при відновлюванні відкачування води витрати електроенергії пропорційні витраті води з коефіцієнтом $7128,9 \text{ кВт/м}^3/\text{с}$.

5. Враховуючи постійну мінливість параметрів режимів функціонування головних водовідливних комплексів, стає очевидним, що вони потребують впровадження системи керування. Природно, система повинна спиратися, перш за все, на сигнали датчиків стану рівнів наповнення підземних водозбірників водою і в залежності та у відповідності до інших параметрів. Враховуючи стохастичний характер водоприпливу в часі надходження шахтних вод, система керування повинна бути організована якнайменше на базі експертних систем, чи, що ефективніше, з технологією інтелектуального керування і це є предметом подальших досліджень.

6. Функціонування узагальненої системи керування водовідливним комплексом повинно бути на основі багатокритеріального аналізу параметрів об'єкту керування і відповідної реакції на це алгоритму роботи даної системи.

РОЗДІЛ 4
ФОРМАТ РОЗБУДОВИ АЛГОРИТМУ ТА АРХІТЕКТУРИ КЕРУВАННЯ
РЕЖИМАМИ ФУНКЦІОНУВАННЯ ГОЛОВНИХ ВОДОВІДЛИВНИХ
КОМПЛЕКСІВ ШАХТ НА БАЗІ НЕЧІТКОГО ЛОГІЧНОГО ВИВОДУ
МАМДАНИ

4.1 Головний водовідливний комплекс залізорудної шахти – об’єкт нечіткого керування

У розділі 3 даного дослідження було проаналізовано, оцінено і підтверджено на реальних прикладах необхідність переформатування ЕМС насосних агрегатів, які експлуатуються в діючий період часу в складі ГВК із нерегульованих видів – у регульовані. Такий старт у процесі формування алгоритму і структури функціонування СК, окрім покращення електро-економічних показників ГВК, дозволить розбудовувати на цій основі енергоефективну адаптивну узагальнену структуру функціонування. Окрім цього в Додатку В наведено рамочне оцінювання рівнів очікуваної ефективності ряду інших тривіальних і потенційно можливих енергоефективних за характером заходів. Окрім підсистеми адаптивного керування режимами роботи ЕМС, вимальовується квінтесенція розбудови алгоритму функціонування і відповідної структури другої підсистеми керування, яка повинна мати два базові технологічні вхідні параметри: рівні водоприпливу в поточному часі та погодинну в добі вартість електроенергії (або собівартість виробництва електроенергії у випадку наявності джерел розподіленої генерації)*.

* Для адресного втілення результатів дослідження в практику роботи ГВК тієї чи іншої конкретної залізорудної шахти, з метою отримання реально очікуваного і реально досяжного потенціалу ефективності, до теоретичних висновків, які викладено в даному розділі, потрібно виконати додатково ряд превентивних заходів щодо відповідності існуючих (діючих) структур та параметрів водовідведення згідно до їх проєктних вимог.

Вихідною координатою в такому підході виступає потужність електромеханічних комплексів насосних агрегатів, що одночасно знаходяться у роботі, тобто, їх загальна потужність.

У Розділі 3 наведено превентивний варіант структури СК з акцентом на функціонування відповідної підсистеми – керування ЕМС в їх енергоефективному форматі в структурі ГВК. Не розглянуто другу підсистему – керування режимами роботи ГВК згідно її технологічних параметрів і тарифів на ЕЕ.

Для більшої наочності розглянемо процес синтезу системи керування споживанням електроенергії ГВК у складі підземного гірничорудного підприємства на прикладі типового для даних виробництв технологічного обладнання ГВК діючої залізорудної шахти «Криворізька» (м. Кривий Ріг).

Секції ГВК розміщуються на відповідних горизонтах і включають декілька насосів, як правило, одного типу та потужності. На тих же горизонтах розміщують додаткові до головного водозбірники, розмір яких дозволяє накопичувати потрібні об'єми шахтних вод, що поступають на конкретний горизонт з інших (більш «глибоких»).

В якості об'єкту керування був прийнятий діючий водовідлив горизонту 500 м шахти «Криворізька» (м. Кривий Ріг) (рис. 4.1). Враховуючи, що даний горизонт є передкінцевою стадією перед відкачуванням води на поверхню, куди потрапляє вода з усього внутрішнього простору шахти, він оснащується водозбірником найбільшого розміру і, як наслідок, найбільш потужними насосами. У результаті діючий водовідлив горизонту 500 м є одним із найбільш енергоємних споживачів водовідливу і усієї шахти в цілому.

Секція водовідливу горизонту 500 метрів містить сім насосів типу ЦНС-300х600 із номінальною потужністю 800 кВт кожен (Додаток Е). Зниження, порівняно з проектними, обсягів водоприпливу в аналізовану шахту (табл. 4.1) призвело до необхідності одночасного використання лише трьох насосів при максимальному рівні надходження води у водозбірник і одного або двох при нормальному його наповненню.

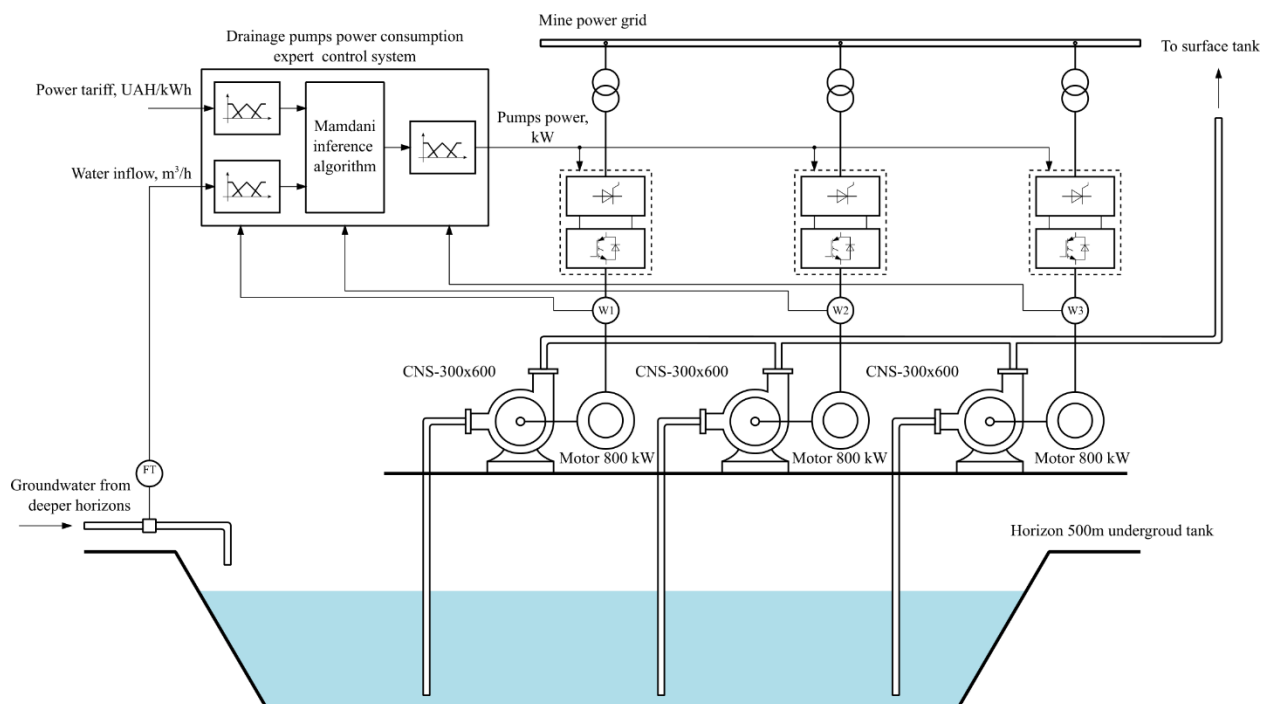


Рисунок 4.1 – Структурна схема системи керування комплексом відведення підземних вод на прикладі діючого горизонту 500 м шахти «Криворізька» (м. Кривий Ріг)

Таблиця 4.1 – Річні обсяги притоку підземних вод у шахту «Криворізька» (м. Кривий ріг)

№ з/п	Рік	Водоприплив, м ³ /рік
1	2016	3281132
2	2017	3709753
3	2018	4416601
4	2019	4619121
5	2020	4784339
6	2021	4673021

Врахуємо вище означені особливості під час побудови автоматизованої системи керування споживанням електроенергії електрообладнанням горизонту 500 метрів. Розглянемо дану процедуру більш детально.

4.2 Обґрунтування методу нечіткого керування споживанням електроенергії головним водовідливним комплексом залізорудної шахти

Спираючись на аналіз і практичні результати попередніх досліджень у напрямку вибору методів інтелектуального керування, можна стверджувати, що до найбільш перспективних зараз відносяться ті, що використовують апарат нечіткої логіки, штучних нейронних мереж та машинного навчання [123-126]. При чому, в задачах, коли об'єкт має декілька вхідних змінних, у такому форматі доцільно застосувати нечіткий логічний вивід через простоту синтезу і реалізації алгоритмів керування [127, 128].

Так як ГВК залізорудної шахти, як об'єкт керування, являє собою систему з двома входами (вартість електроенергії і обсяги водоприпливу підземних вод) та одним виходом (потужність насосних установок), а також враховуючи, що усі три означені координати піддаються експертній оцінці, в якості структури управління доцільно застосувати нечіткий алгоритм Мамдані [129-132].

Формування функцій приналежності до нечітких множин здійснюється використанням математичних функцій двох видів, що дозволить провести порівняння ефективності застосування систем нечіткого виводу різних конфігурацій. Спочатку будуть розглянуті кусково-лінійні функції, як найбільш прості в реалізації. Додатково застосуємо гладкі функції – гауссової та сигмоїдної форм [133-136].

4.3 Розробка інтелектуальної експертної системи керування споживанням електроенергії головним водовідливним комплексом залізорудної шахти

4.3.1 Фазифікація лінгвістичних змінних нечіткої системи керування

Кожна координата структури нечіткого логічного виводу, а саме «водоприплив», «тариф на електроенергію» і «потужність насосних агрегатів» представляються відповідними лінгвістичними змінними.

Для формування функцій приналежності лінгвістичної змінної «водоприплив» використовується кінцева множина Q визначена на інтервалі $\{q_i \in \mathbb{R} \mid q_{\min} \leq q_i \leq q_{\max}\}$, де q_{\min} і q_{\max} , відповідно, мінімальний та максимальний рівень надходження ґрунтових вод у шахту. Прийmemo, що лінгвістична змінна включає три нечіткі множини: «низький водоприплив» (Q_L), «нормальний водоприплив» (Q_N) і «високий водоприплив» (Q_H). Функція приналежності до нечіткої множини «нормальний водоприплив» задається трикутною, до множини «високий водоприплив» – S -подібною, а до множини «низький водоприплив» – Z -подібною.

При параметризації функцій приналежності в якості базової величини було прийнято усереднене значення водоприпливу за 6 років (див. табл. 1.1), яке складає $q_m = 484,85$ м³/год. Приймаємо, що високий водоприплив у 2,5 рази більший за нормальний, а низький – у 2 рази менший і вони складають $q_l = 1212,13$ м³/год та $q_h = 242,43$ м³/год, відповідно. При цьому мінімальне значення встановимо на рівні $q_{\min} = 0$ м³/год, а максимальне – $q_{\max} = 1500$ м³/год.

Функція приналежності до нечіткої множини Q_N визначається наступним виразом:

$$\begin{aligned} \mu_{Q_N}(q) &= f(q; q_l, q_m, q_h) = \\ &= \max \left[\min \left(\frac{q - q_l}{q_m - q_l}, \frac{q_h - q}{q_h - q_m} \right), 0 \right], \end{aligned} \quad (4.1)$$

при цьому:

$$\text{core}(Q_N) = \{q_m\} = 484,85 \text{ м}^3/\text{год},$$

$$\text{supp}(Q_N) = \{q \in \mathbb{R} \mid q_l \leq q \leq q_h\} = 969,71 \text{ м}^3/\text{год}.$$

Вираз для визначення функції приналежності до нечіткої множини Q_L :

$$\begin{aligned} \mu_{Q_L}(q) &= f(q; q_{\min} - 1, q_{\min}, q_l, q_m) = \\ &= \max \left[\min \left(\frac{q - (q_{\min} - 1)}{q_{\min} - (q_{\min} - 1)}, 1, \frac{q_m - q}{q_m - q_l} \right), 0 \right], \end{aligned} \quad (4.2)$$

при цьому:

$$\text{core}(Q_L) = \{q \in \mathbb{R} \mid 0 \leq q \leq q_l\} = 242,43 \text{ м}^3/\text{год},$$

$$\text{supp}(Q_L) = \{q \in \mathbb{R} \mid 0 \leq q \leq q_m\} = 484,85 \text{ м}^3/\text{год}.$$

Вираз для визначення функції приналежності до нечіткої множини Q_N :

$$\begin{aligned} \mu_{Q_N}(q) &= f(q; q_m, q_h, q_{\max}, q_{\max} + 1) = \\ &= \max \left[\min \left(\frac{q - q_m}{q_h - q_m}, 1, \frac{q_{\max} + 1 - q}{q_{\max} + 1 - q_{\max}} \right), 0 \right], \end{aligned} \quad (4.3)$$

при цьому:

$$\text{core}(Q_H) = \{q \in \mathbb{R} \mid q_h \leq q \leq q_{\max}\} = 287,86 \text{ м}^3/\text{год},$$

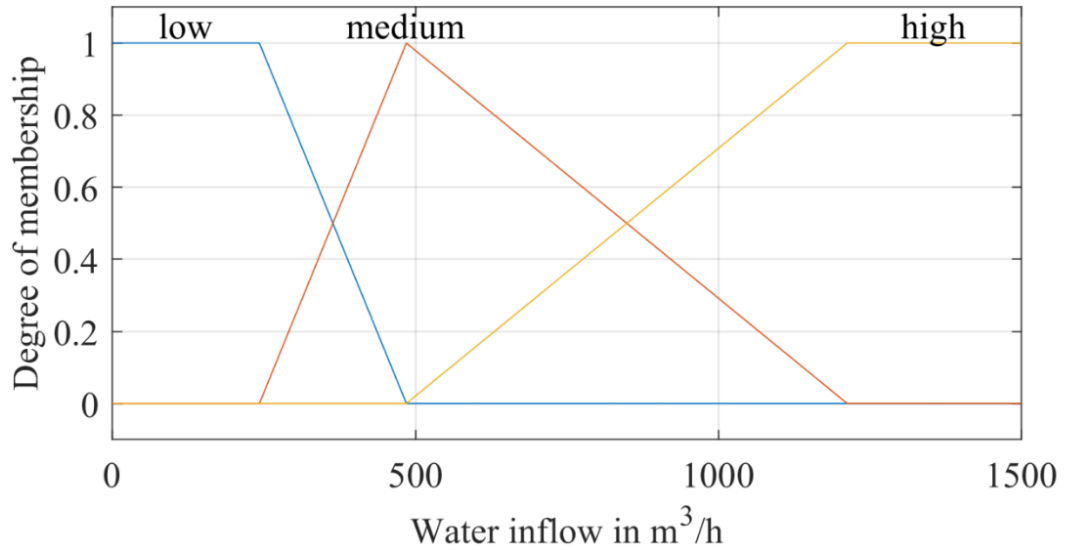
$$\text{supp}(Q_H) = \{q \in \mathbb{R} \mid q_m \leq q \leq q_{\max}\} = 1015,15 \text{ м}^3/\text{год}.$$

При заданні функцій приналежності до нечітких множин Q_L і Q_H верхнє і нижнє опорне значення виходять за межі кінцевої множини Q , а саме збільшуються та зменшуються на одиницю, відповідно. Це робиться для уникнення ситуації ділення на нуль.

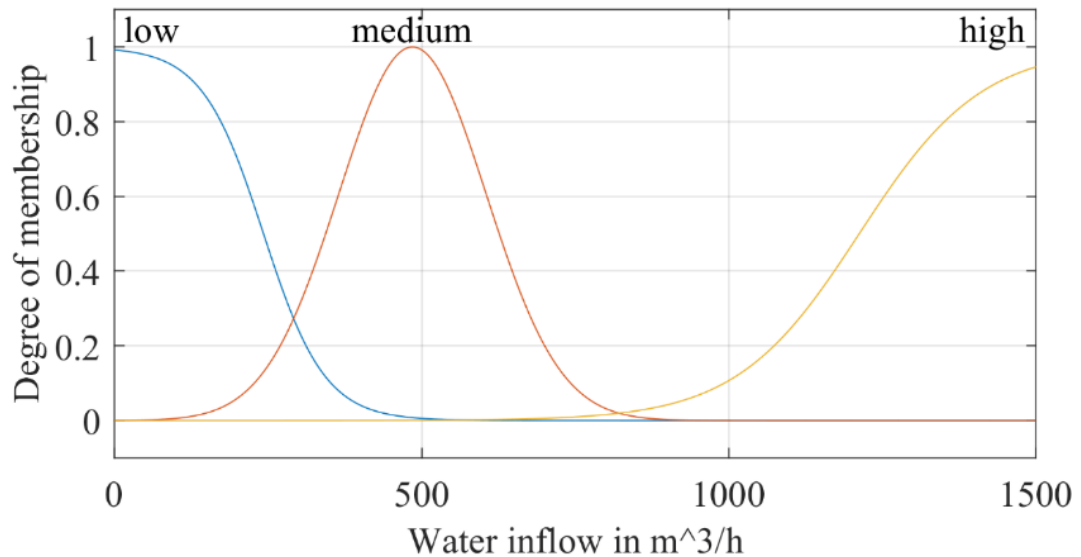
При застосуванні гладких функцій [136] приналежності до множин «низький водоприплив» і «високий водоприплив» визначаються сигмоїдами з середніми значеннями q_l та q_h , відповідно. Параметр, що відповідає за кут нахилу, встановлювався відповідно 0,02 і 0,01. Функція належності до множини «нормальний водоприплив» має гауссову форму з середнім значенням q_m і стандартним відхиленням 120.

Графічне представлення функцій приналежності до нечітких множин лінгвістичної змінної «водоприплив» наведено на рис. 4.2.

Фазифікацію лінгвістичної змінної «тариф на електроенергію» виконаємо, виходячи з наступних міркувань. Як відомо, в форматі реалізації Закону України «Про ринок електричної енергії» з 01.07.2019 року було впроваджено нову систему розрахунків за спожиту електроенергію між промисловими підприємствами і операторами розподілу.



а)



б)

Рисунок 4.2 – Функції приналежності до нечіткої змінної «водоприплив»: а) кусково-лінійні функції; б) гладкі функції

Дана система передбачає введення моделі погодинної оплати за електроенергію, при якій її вартість змінюється кожної години в залежності від стану ринку. Причому, попередньо за добу підприємство замовляє в оператора розподілу обсяги потужності, які прогнозується споживати протягом кожної години наступного дня. Такий підхід кардинально відрізняється від розрахунків відповідно до тарифів, диференційованих за

періодами часу, що діяли раніше, коли вартість електроенергії була фіксованою. Разом із тим, аналіз структури погодинної оплати дозволяє стверджувати, що за вартістю електроенергії доцільно виділити три зони, коли її рівень високий, середній або низький. При цьому періоди доби, коли діють зазначені зони, практично співпадають із періодами піку, напівпіку і ночі. Це пояснюється характером графіку електричних навантажень, а саме, високим рівнем споживання електроенергії зранку і ввечері, низьким – вночі та середнім – протягом світлового дня. Таким чином, для формалізації нечіткого алгоритму керування диференціюємо вартість електроенергії за величиною по зонам «піку», «напівпіку» і «ночі».

В якості опорних значень для завдання функцій приналежності для лінгвістичної змінної «тариф на електроенергію» використаємо значення тарифів, які встановлені оператором розподілу електроенергії АТ «ДТЕК Дніпровські Електромережі» [112]. Тариф у зоні «напівпік» – $c_{HP} = 2,93$ грн/кВт·год, у зоні «пік» – $c_{PK} = 3,21$ грн/кВт·год і у зоні «ніч» – $c_{NT} = 2,66$ грн/кВт·год. Ці три значення використовуються в якості опорних при формуванні функцій приналежності та їх подальшій параметризації.

Лінгвістична змінна «вартість електроенергії» визначена кінцевою множиною на інтервалі $\{c \in \mathbb{R} \mid c_{\min} \leq c \leq c_{\max}\}$, де $c_{\min} = 1,5$ грн/кВт·год, $c_{\max} = 3,5$ грн/кВт·год. Представимо змінну трьома нечіткими множинами: «нічна зона», «напівпікова зона» і «пікова зона».

Функція приналежності до нечіткої множини «нічна зона» задається Z-подібною:

$$\begin{aligned} \mu_{c_{NT}}(c) &= f(c; c_{\min} - 1, c_{\min}, c_{NT}, c_{HP}) = \\ &= \max \left[\min \left(\frac{c - (c_{\min} - 1)}{c_{\min} - (c_{\min} - 1)}, 1, \frac{c_{HP} - c}{c_{HP} - c_{NT}} \right), 0 \right]. \end{aligned} \quad (4.4)$$

Функція приналежності до нечіткої множини «напівпікова зона» трикутна з такими характеристиками:

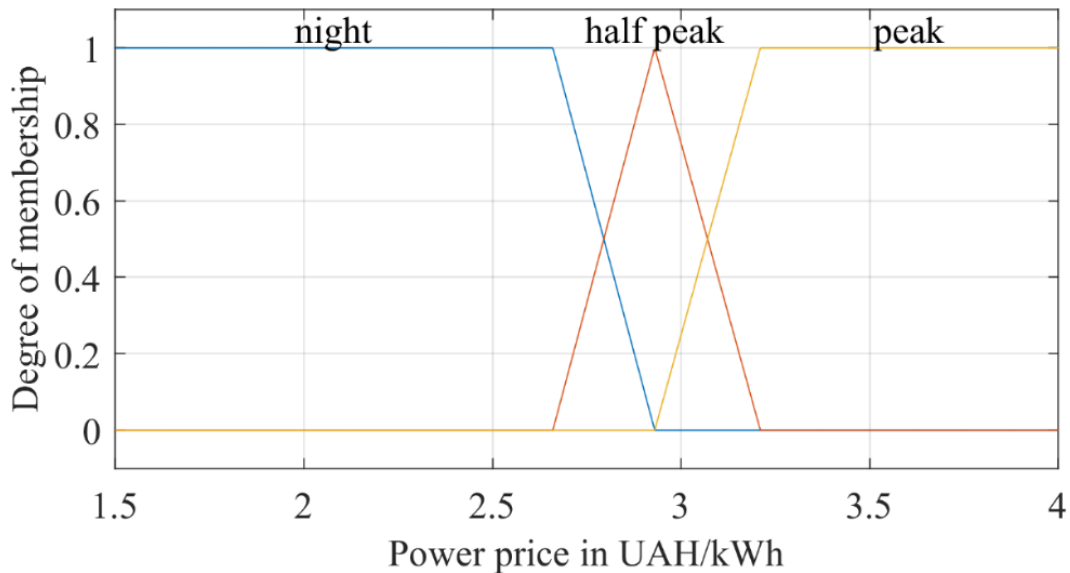
$$\begin{aligned} \mu_{c_{HP}}(c) &= f(c; c_{NT}, c_{HP}, c_{PK}) = \\ &= \max \left[\min \left(\frac{c - c_{NT}}{c_{HP} - c_{NT}}, \frac{c_{PK} - c}{c_{PK} - c_{NT}} \right), 0 \right]. \end{aligned} \quad (4.5)$$

Функція приналежності до нечіткої множини «пікова зона» S-подібна з такими характеристиками:

$$\begin{aligned} \mu_{c_{PK}}(c) &= f(c; c_{HP}, c_{PK}, c_{\max}, c_{\max} + 1) = \\ &= \max \left[\min \left(\frac{c - c_{HP}}{c_{PK} - c_{HP}}, 1, \frac{c_{\max} + 1 - c}{c_{\max} + 1 - c_{\max}} \right), 0 \right]. \end{aligned} \quad (4.6)$$

При застосуванні гладких функцій приналежності до множин «ніч» і «пік» визначаються сигмоїдами з середніми значеннями c_{NT} та c_{PK} , відповідно. Параметр, що відповідає за кут нахилу, встановлювався відповідно -25 і 25. Функція приналежності до множини «напівпік» має гауссову форму з середнім значенням c_{HP} і стандартним відхиленням 0,25.

Графічне представлення функцій приналежності до нечітких множин змінної «тариф на електроенергію» представлено на рис. 4.3.



a)

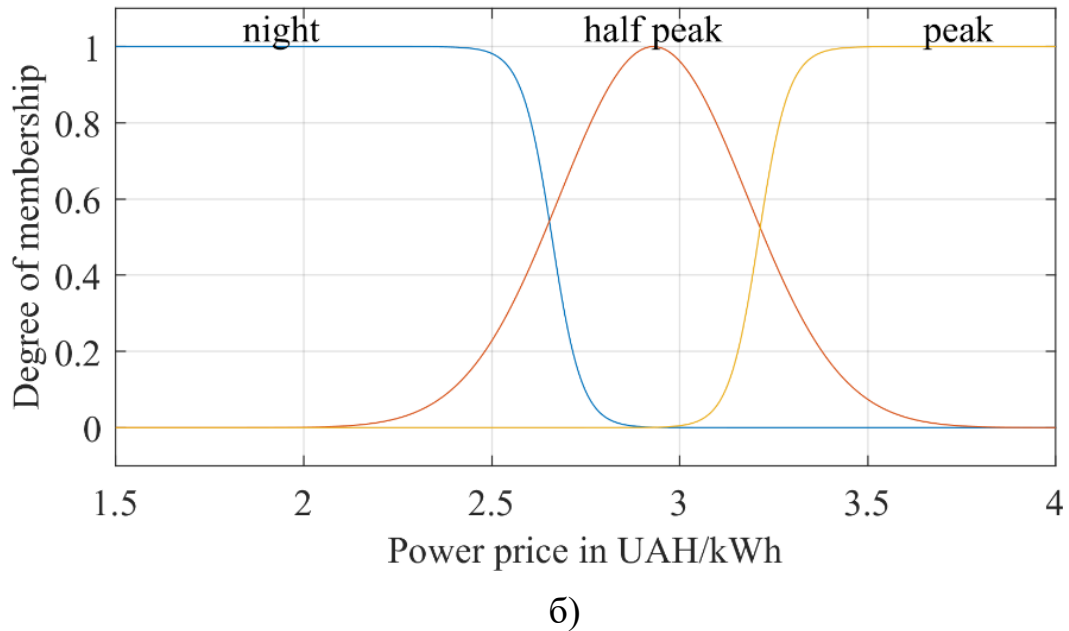


Рисунок 4.3 – Функції приналежності до нечіткої змінної «тариф на електроенергію»: а) кусково-лінійні функції; б) гладкі функції

Вихідною координатою нечіткої системи керування споживанням електроенергії є сумарна вихідна потужність, що споживається насосами водовідливу [136]. Причому доцільно орієнтуватися саме на величину цього електричного параметру, а не на число агрегатів, що одночасно знаходяться в роботі, тому що сучасні системи електроприводу насосів оснащуються напівпровідниковими перетворювачами частоти, які дозволяють регулювати вихідну потужність турбомеханізмів у широких межах.

Відповідно до статичної характеристики $P = f(Q)$ насоса ЦНС-300х600 (Додаток Е) для номінальної кутової частоти обертання 1485 об/хв його робоча частина характеристики знаходиться в межах продуктивності 220-360 м³/год при діапазоні зміни потужності 625-825 кВт. Враховуючи те, що на водовідливі працює від одного до трьох насосів, кінцеву множину для завдання лінгвістичної змінної «потужність насосних агрегатів» доцільно визначити на інтервалі $\{p \in \mathbb{R} \mid p_{\min} \leq p \leq p_{\max}\}$, де $p_{\min} = 625$ кВт – нижній рівень потужності водовідливу, що відповідає мінімальній потужності одного

насоса типу ЦНС, $p_{\max} = 2475$ кВт (Додаток Е), тобто коли усі три насоси працюють із найвищою продуктивністю і на максимальній потужності.

Під час фазифікації представимо лінгвістичну змінну «потужність насосних агрегатів» трьома нечіткими множинами, що відповідають загальній потужності, яка споживається одним, двома або трьома насосними установками. Усі три функції приналежності до нечітких множин задамо трикутними і виконаємо процедуру фазифікації.

Функцію приналежності до нечіткої множини «потужність одного насоса» визначаємо за наступним виразом:

$$\begin{aligned} \mu_{P_{OP}}(p) &= f(p; p_{\min}, p_{nom}, p_{\max} + p_{\min}) = \\ &= \max \left[\min \left(\frac{p - p_{\min}}{p_{nom} - p_{\min}}, \frac{p_{\max} + p_{\min} - p}{p_{\max} + p_{\min} - p_{nom}} \right), 0 \right], \end{aligned} \quad (4.7)$$

причому:

$$\text{core}(P_{OP}) = \{p_{nom}\} = 800 \text{ кВт},$$

$$\text{supp}(P_{OP}) = \{p \in \mathbb{R} \mid p_{\min} \leq p \leq p_{\max} + p_{\min}\} = 825 \text{ кВт}.$$

Особливістю даної функції є те, що верхнє опорне значення прийнято таким, що передбачається робота одного насоса на максимальній потужності, а другий додатково здійснює відкачування води з мінімально допустимим споживанням потужності, тобто $q_{\max} + q_{\min} = 1425$ кВт.

Наступна функція приналежності до нечіткої множини «потужність двох насосів» формулюється з наступних міркувань. Опорне значення нижньої межі приймається з урахуванням того, що обидва насоси одночасно будуть працювати на мінімумі своїх робочих характеристик, тобто їх потужність становитиме $2 \cdot p_{\min} = 1250$ кВт. Опорне значення верхньої межі задаємо, передбачаючи, що одночасно два насоси будуть працювати на максимумі робочої ділянки статичної характеристики, а третій вводиться в роботу на мінімумі, тобто $2 \cdot p_{\max} + p_{\min} = 2275$ кВт. У результаті функція приналежності задається таким чином:

$$\begin{aligned}\mu_{P_{TP}}(p) &= f(p; 2p_{\min}, 2p_{\text{nom}}, 2p_{\max} + p_{\min}) = \\ &= \max \left[\min \left(\frac{p - 2p_{\min}}{2p_{\text{nom}} - 2p_{\min}}, \frac{2p_{\max} + p_{\min} - p}{2p_{\max} + p_{\min} - 2p_{\text{nom}}} \right), 0 \right],\end{aligned}\quad (4.8)$$

причому:

$$\text{core}(P_{TP}) = \{2p_{\text{nom}}\} = 1600 \text{ кВт},$$

$$\text{supp}(P_{OP}) = \{p \in \mathbb{R} \mid 2p_{\min} \leq p \leq 2p_{\max} + p_{\min}\} = 1025 \text{ кВт}.$$

Аналогічно задається функція приналежності до нечіткої множини «потужність трьох насосів». Причому приймається, що опорне значення для нижньої межі передбачає роботу трьох насосів із мінімальною потужністю споживання $3 \cdot p_{\min} = 3 \cdot 625 = 1875$ кВт, а для верхньої межі – трьох насосів із максимальною потужністю $3 \cdot p_{\max} = 3 \cdot 825 = 2475$ кВт:

$$\begin{aligned}\mu_{P_{TRP}}(p) &= f(p; 3p_{\min}, 3p_{\text{nom}}, 3p_{\max}) = \\ &= \max \left[\min \left(\frac{p - 3p_{\min}}{3p_{\text{nom}} - 3p_{\min}}, \frac{3p_{\max} - p}{3p_{\max} - 3p_{\text{nom}}} \right), 0 \right],\end{aligned}\quad (4.9)$$

причому:

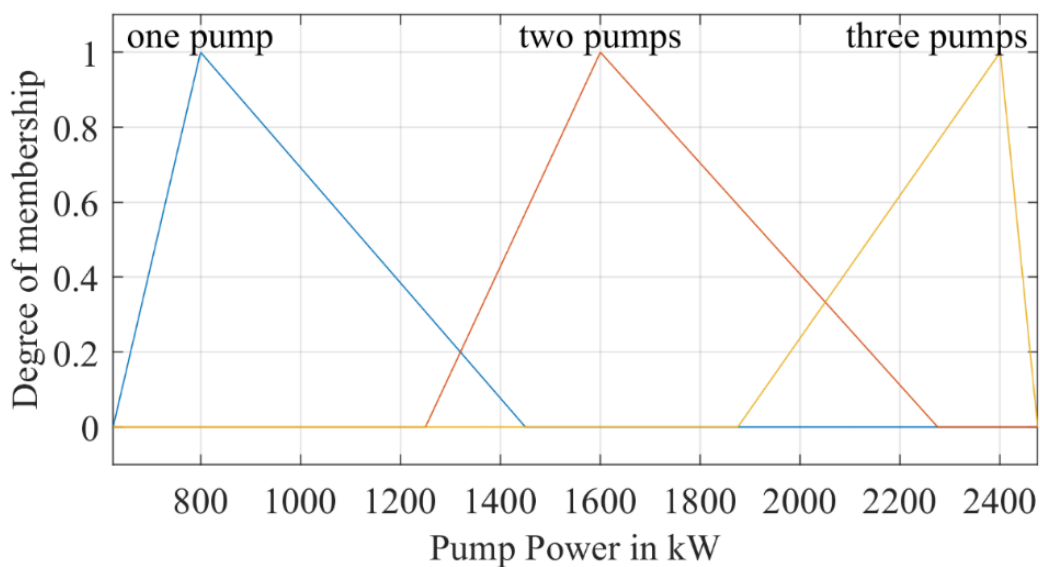
$$\text{core}(P_{TRP}) = \{3p_{\text{nom}}\} = 2400 \text{ кВт},$$

$$\text{supp}(P_{TRP}) = \{p \in \mathbb{R} \mid 3p_{\min} \leq p \leq 3p_{\max}\} = 600 \text{ кВт}.$$

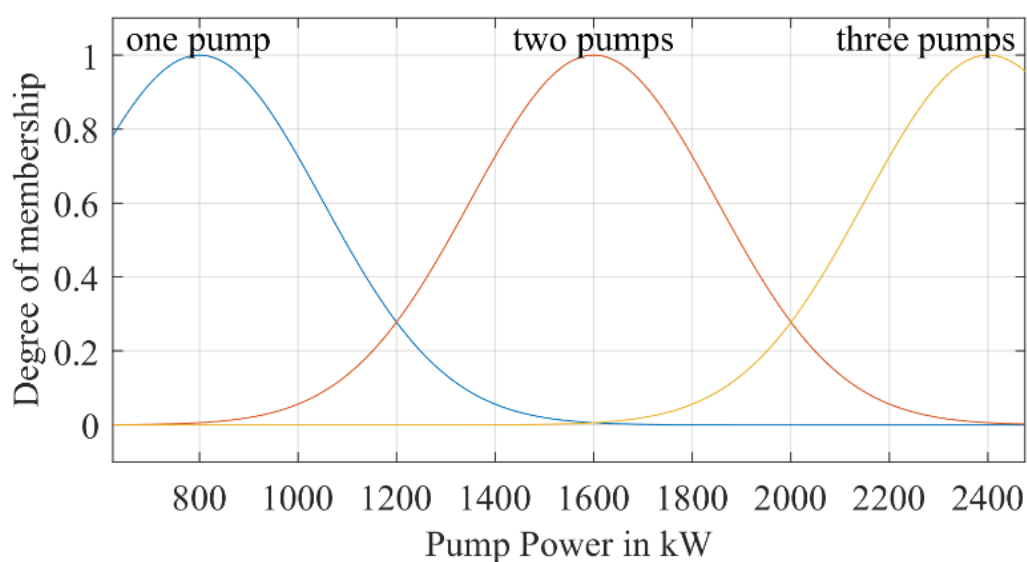
Для перших двох функцій приналежності верхня межа включає введення в роботу додаткового насоса з мінімальною потужністю споживання, коли в системі нечіткого логічного виводу в області визначення кінцевої множини виникають інтервали, що не належать до жодної нечіткої множини, які визначені для лінгвістичної змінної. Наприклад, верхнє опорне значення для функції приналежності до нечіткої множини «потужність одного насоса» доцільно було б встановити на рівні $q_{\max} = 825$ кВт, проте нижня межа функції для нечіткої множини «потужність двох насосів» становить $2p_{\min} = 1250$ кВт. У результаті виникає ситуація, коли діапазон потужностей від 825 кВт до 1250 кВт не належить до жодної нечіткої множини, що значно знижує гнучкість керування.

При застосуванні гладких усі три функції приналежності до множин «потужність одного насоса», «потужність двох насосів» і «потужність трьох насосів» мають гауссову форму з середніми значенням p_{nom} , $2p_{nom}$, $3p_{nom}$ та стандартним відхиленням 250.

Функції приналежності до нечіткої змінної «потужність насосних агрегатів» наведено на рис. 4.4.



a)



б)

Рисунок 4.4 – Функції приналежності до нечіткої змінної «потужність насосних агрегатів»: а) кусково-лінійні функції; б) гладкі функції

4.3.2 Синтез бази правил системи нечіткого виводу

Після завершення етапу фазифікації потрібно сформувати базу правил системи нечіткого виводу Мамдані. Дана процедура здійснюється з урахуванням технологічних вимог до режимів роботи шахтного водовідливу, основною з яких є забезпечення відповідної продуктивності відкачування ґрунтових вод при різних рівнях інтенсивності їх надходження у внутрішній простір шахти. Це здійснюється для уникнення затоплення стволу і горизонтів шахти, що створює небезпеку для життя людини та робить неможливим виконання технологічних операцій видобутку залізної руди. Тому, найвищий рівень значимості надаємо тим, які включають нечітку множину «високий водоприплив».

Так як система має два входи, то умовна частина правил у базі використовує нечіткі оператори кон'юнкції AND для встановлення логічного відношення між вхідними змінними системи нечіткого виводу.

Здійснимо формалізацію правил.

В усіх випадках, коли буде спостерігатися високий водоприплив у шахту, необхідно вводити в роботу усі три насоси, не зважаючи на тариф на електроенергію, що діє у поточний період часу. При цьому, вагу даного блоку правил встановлюємо на рівні 1, що визначає найвищу значимість цих правил. У результаті вони мають наступну форму:

R1: IF (*q* is *H*) AND (*c* is *NT*) THEN *p* is *TR*;

R2: IF (*q* is *H*) AND (*c* is *HP*) THEN *p* is *TR*;

R3: IF (*q* is *H*) AND (*c* is *PK*) THEN *p* is *TR*.

При нормальному водоприпливі вихідна потужність споживання насосних агрегатів водовідливу залежить від діючого тарифу. Доцільно при «нічному» тарифі відкачувати воду з максимальною продуктивністю усіма трьома насосами горизонту, при «напівпіковому» – двома, а при «піковому» – тільки одним. Вагу даного блоку правил визначаємо на рівні 0,75. У результаті правила мають наступну форму:

R4: **IF** (q is M) **AND** (c is NT) **THEN** p is TR ;

R5: **IF** (q is M) **AND** (c is HP) **THEN** p is TW ;

R6: **IF** (q is M) **AND** (c is PK) **THEN** p is ON .

Не зважаючи на вартість електроенергії, при низькому водоприпливі доцільно відведення води здійснювати тільки одним насосом, тому наступна сукупність правил має такий вигляд:

R7: **IF** (q is L) **AND** (c is NT) **THEN** p is ON ;

R8: **IF** (q is L) **AND** (c is HP) **THEN** p is ON ;

R9: **IF** (q is L) **AND** (c is PK) **THEN** p is ON .

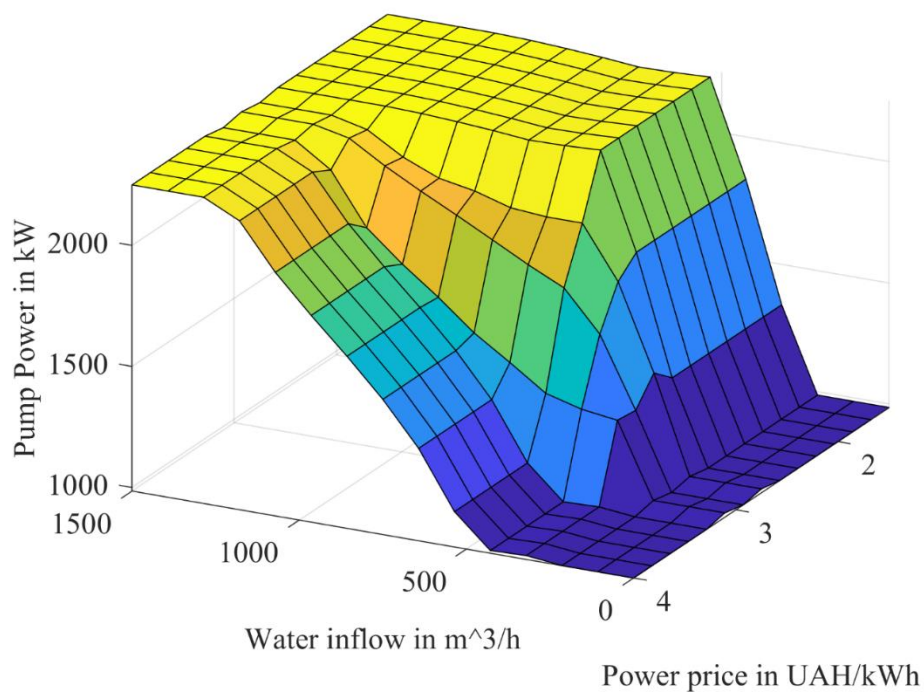
Вага даної сукупності правил, як і для попереднього блоку, прийнята 0,75.

Результуюча таблиця нечітких правил буде наступною (див. табл. 4.2).

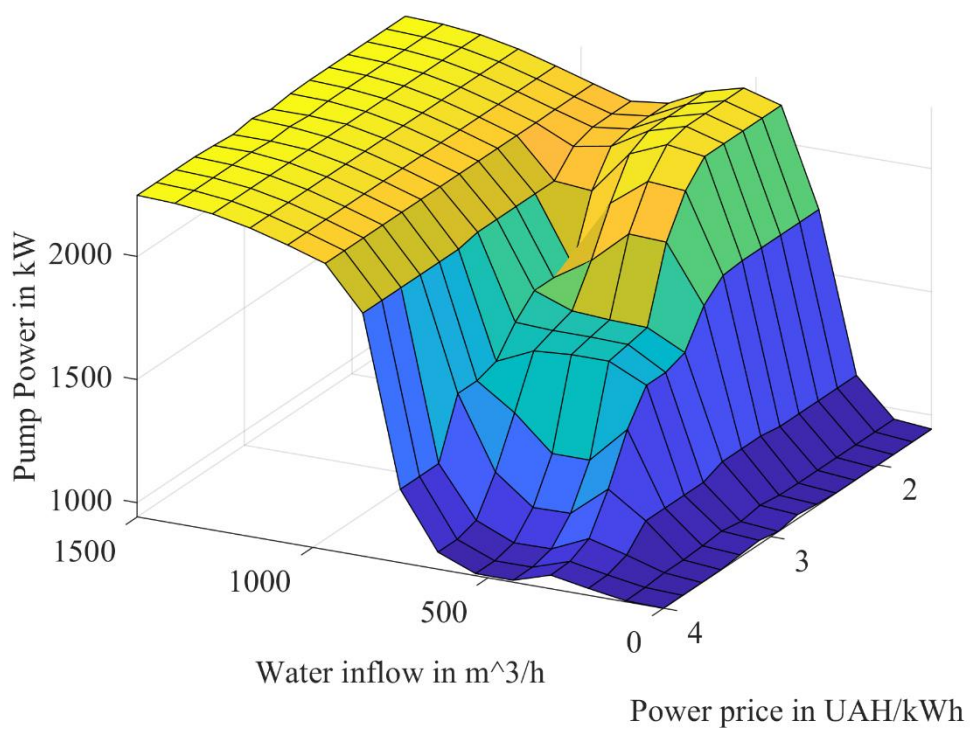
Таблиця 4.2 – База правил типу AND нечіткої системи керування споживанням електроенергії установками водовідливу

	NT	HP	PK
L	ON	ON	ON
M	TR	TW	ON
H	TR	TR	TR

Вихідна поверхня системи нечіткого виводу Мамдані з дев'ятьма правилами типу **AND** наведена на рис. 4.5.



а)



б)

Рисунок 4.5 – Вихідна поверхня системи нечіткого виводу:

а) кусково-лінійні функції; б) гладкі функції

Для порівняння здійснимо синтез бази правил із використанням нечіткого оператора диз'юнкції OR. При цьому агрегати водовідливу споживатимуть максимальну потужність або при високому водоприпливі, або під час дії «нічного» тарифу, а мінімальну – або при низькому водоприпливі, або при «піковому» тарифі. Аналогічно формулюємо правило для нормального водоприпливу і «напівпікового» тарифу. Результуюча база правил має такий вигляд:

R1: **IF** (q is L) **OR** (c is PK) **THEN** p is ON ;

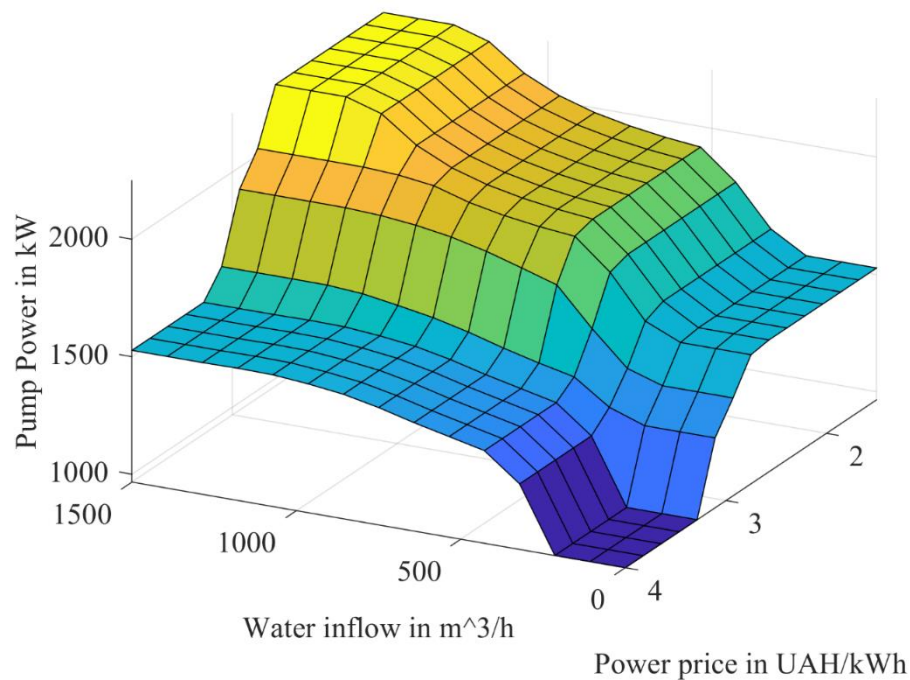
R2: **IF** (q is M) **OR** (c is HP) **THEN** p is TW ;

R3: **IF** (q is H) **OR** (c is NT) **THEN** p is TR ;

Перше правило R1 має вагу 1, а два інших – 0,75.

Відзначимо, що такий підхід не охоплює усі можливі комбінації пар значень вхідних змінних.

Вихідна поверхня системи нечіткого виводу Мамдані з трьома правилами типу **OR** наведена на рис. 4.6.



a)

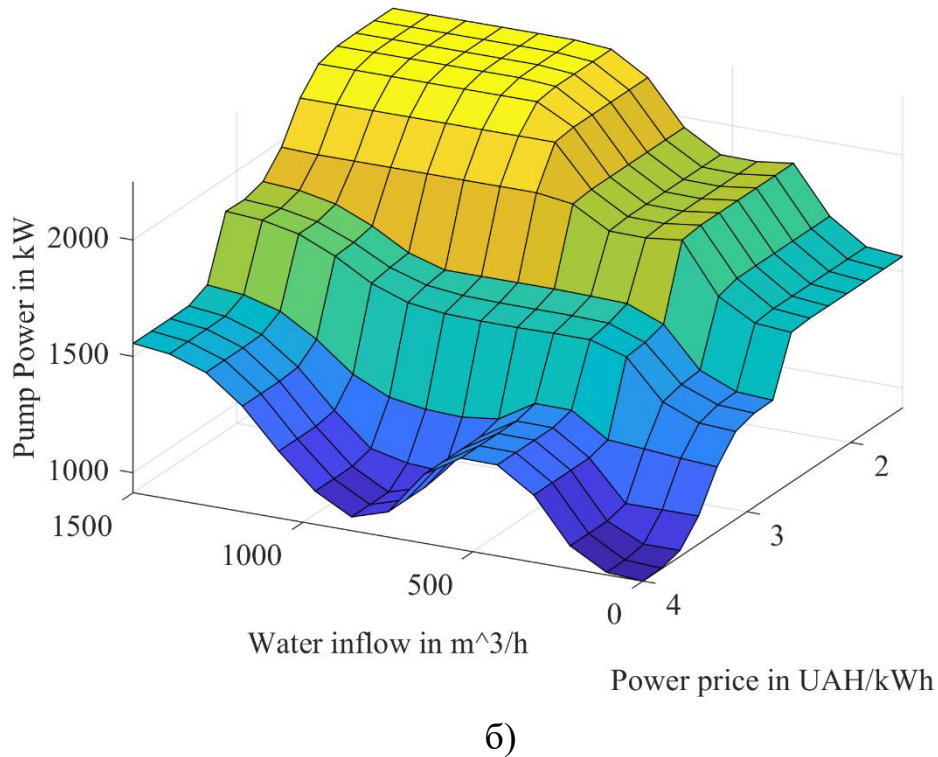


Рисунок 4.6 – Вихідна поверхня системи нечіткого виводу:

а) кусково-лінійні функції; б) гладкі функції

4.4 Імітаційне моделювання процесу функціонування експертної системи керування споживанням електроенергії головними водовідливними комплексами

Проведемо аналіз ефективності роботи нечіткої системи керування енергоспоживанням водовідливу горизонту 500 метрів. Для цього реалізуємо систему в програмному комплексі MATLAB/FuzzyLogicToolbox і виконаємо імітаційне моделювання її роботи.

В якості тестового сигналу для вхідної координати «водоприплив» використаємо реалізацію стохастичного процесу випадкової величини. Закон розподілу ймовірностей приймаємо нормальним із математичним очікуванням $E[Q] = 500 \text{ м}^3/\text{год}$ і дисперсією $\sigma^2 = D[Q] = 200 \text{ м}^3/\text{год}$. Стан генератора псевдовипадкових чисел зафіксуємо програмними засобами для забезпечення

репрезентативності при порівнянні декількох систем керування. Тобто, реалізація стохастичного процесу буде умовно постійною для усіх дослідів.

Тестовий сигнал для вхідної змінної «тариф на електроенергію» сформуємо, виходячи з розподілу за тарифними зонами протягом доби. Тобто, «нічна зона» діє протягом 8 годин із 23.00 до 7.00, «напівпікова» – 11 годин із 7:00 до 8:00, із 11:00 до 20:00 та з 22:00 до 23:00, «пікова» – 5 годин із 8:00 до 11:00, із 20:00 до 22:00. Для спрощення вважатимемо, що електропостачання шахти здійснюється централізовано від зовнішнього оператора розподілу, тому тестовий сигнал буде мати стійкий періодичний характер.

Порівняльний аналіз проведемо для систем нечіткого логічного виводу з базами правил типу AND і OR, а також із системою без керування споживанням електроенергії, в якій протягом усієї доби на водовідливні горизонту працює одночасно два насоси з номінальною продуктивністю і потужністю.

Моделювання роботи систем проводиться протягом аналізованих термінів часу.

Результати експериментів зведено в таблиці 4.3 і 4.4 та представлено на графіках рис. 4.7–4.10.

Отримані результати моделювання роботи водовідливу протягом тижня (табл. 4.3) демонструють, що при застосуванні нечітких систем керування енергоспоживанням рівень витрат на придбання електроенергії в оператора розподілу знижується у порівнянні з системою, в якій таке керування відсутнє.

При цьому, керування з алгоритмом нечіткого логічного виводу з кусково-лінійними функціями приналежності і базою правил типу OR забезпечує на 0,43% (або на 3358,2 грн у грошовому еквіваленті) менший рівень вартості електроенергії протягом тижня, ніж в некерованій системі, а використання бази правил типу AND – на 0,88% (або на 6819,46 грн). Якщо порівнювати між собою інтелектуальні експертні системи, то економічно ефективнішою є система з базою правил типу AND. Вона дозволяє отримати

на 0,43% (на 3461,26 грн) нижчі витрати на електроенергію, ніж система з базою правил OR.

Таблиця 4.3 – Результати моделювання процедури нечіткого керування енергоспоживанням водовідливу горизонту протягом 7 діб

Тип системи керування енергоспоживанням	Середня потужність, кВт	Максимальна потужність, кВт	Споживання електроенергії, кВт·год	Вартість електроенергії, грн
Без керування	1600	1600	268800	779072
Із системою нечіткого логічного вводу і базою правил OR (кусково-лінійні функції)	1646,1	2078,19	276545,38	775713,79
Із системою нечіткого логічного вводу і базою правил AND (кусково-лінійні функції)	1644,23	2243,57	276230,13	772252,53
Із системою нечіткого логічного вводу і базою правил OR (гладкі функції)	1594,53	1825,49	267882,18	771658,89
Із системою нечіткого логічного вводу і базою правил AND (гладкі функції)	1563,93	2160,61	262740,72	758427,14

При застосуванні гладких функцій приналежності рівень витрат на придбання електроенергії знижується значно більше. Так, при застосуванні бази правил типу OR, скорочення тижневої вартості електроенергії становить на 0,95 % (7413,1 грн) менше, ніж у системі без керування, і на 0,52 % (4054,9 грн), ніж в системі з аналогічною базою правил та кусково-лінійними функціями приналежності. Використання бази правил типу AND дає

скорочення на 2,65 % (20644,8 грн) порівняно з системою без керування і на 1,79 % (13825,4 грн) порівняно з системою, що використовує кусково-лінійні функції та ту ж базу правил AND.

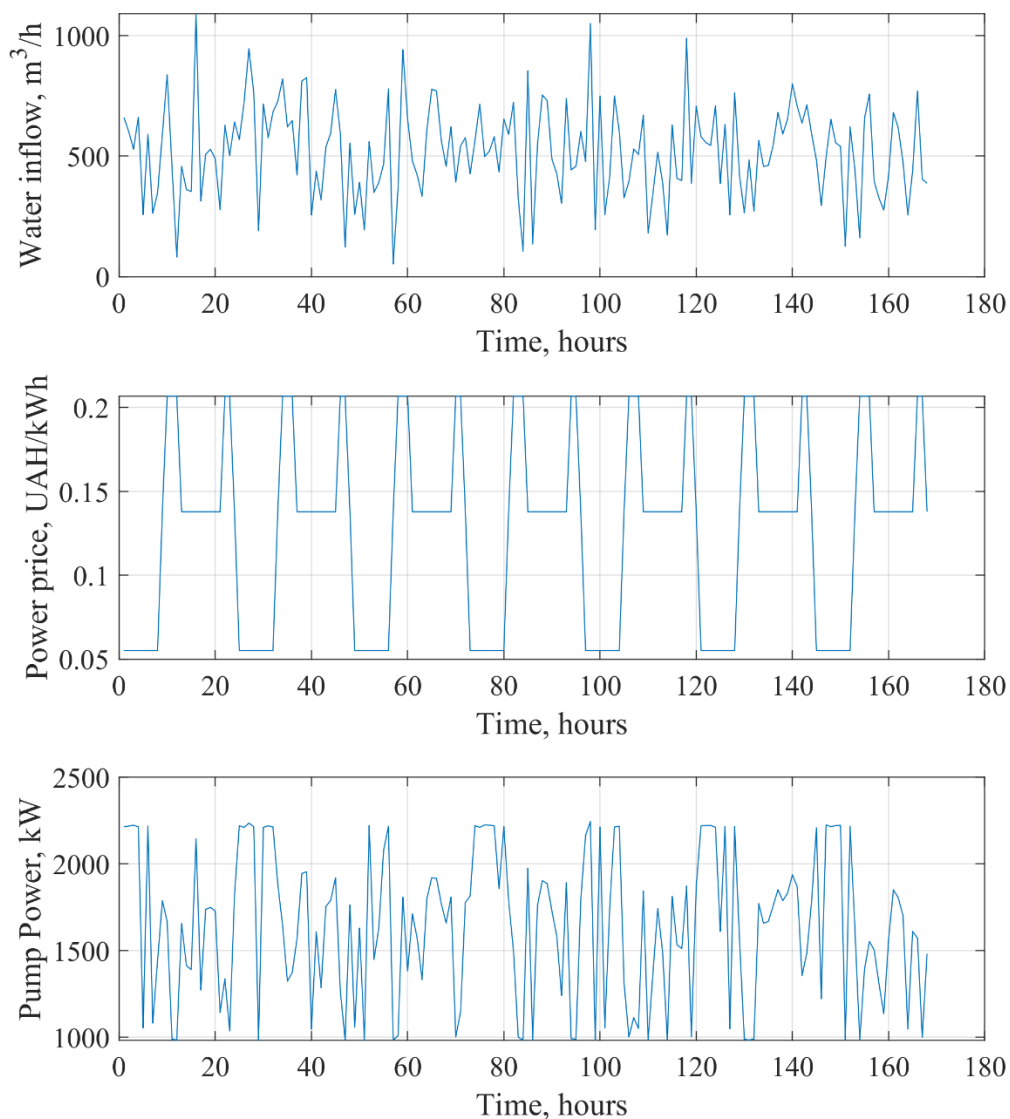


Рисунок 4.7 – Результати моделювання роботи системи керування енергоспоживанням водовідливу на базі алгоритму нечіткого логічного виводу Мамдані з кусково-лінійними функціями приналежності та базою правил типу AND протягом 7 діб

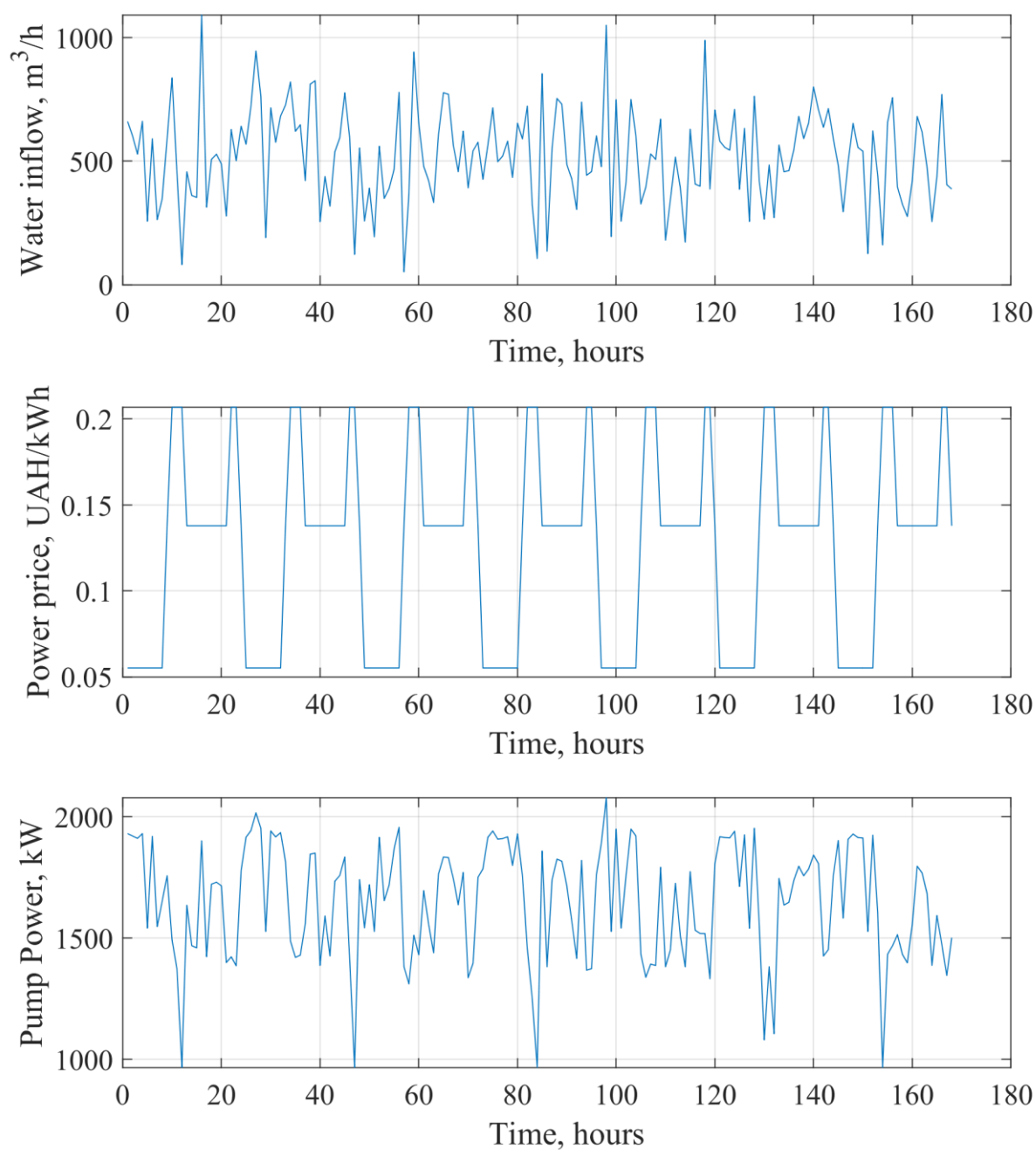


Рисунок 4.8 – Результати моделювання роботи системи керування енергоспоживанням водовідливу на базі алгоритму нечіткого логічного виводу Мамдані з кусково-лінійними функціями приналежності та базою правил типу OR протягом 7 діб

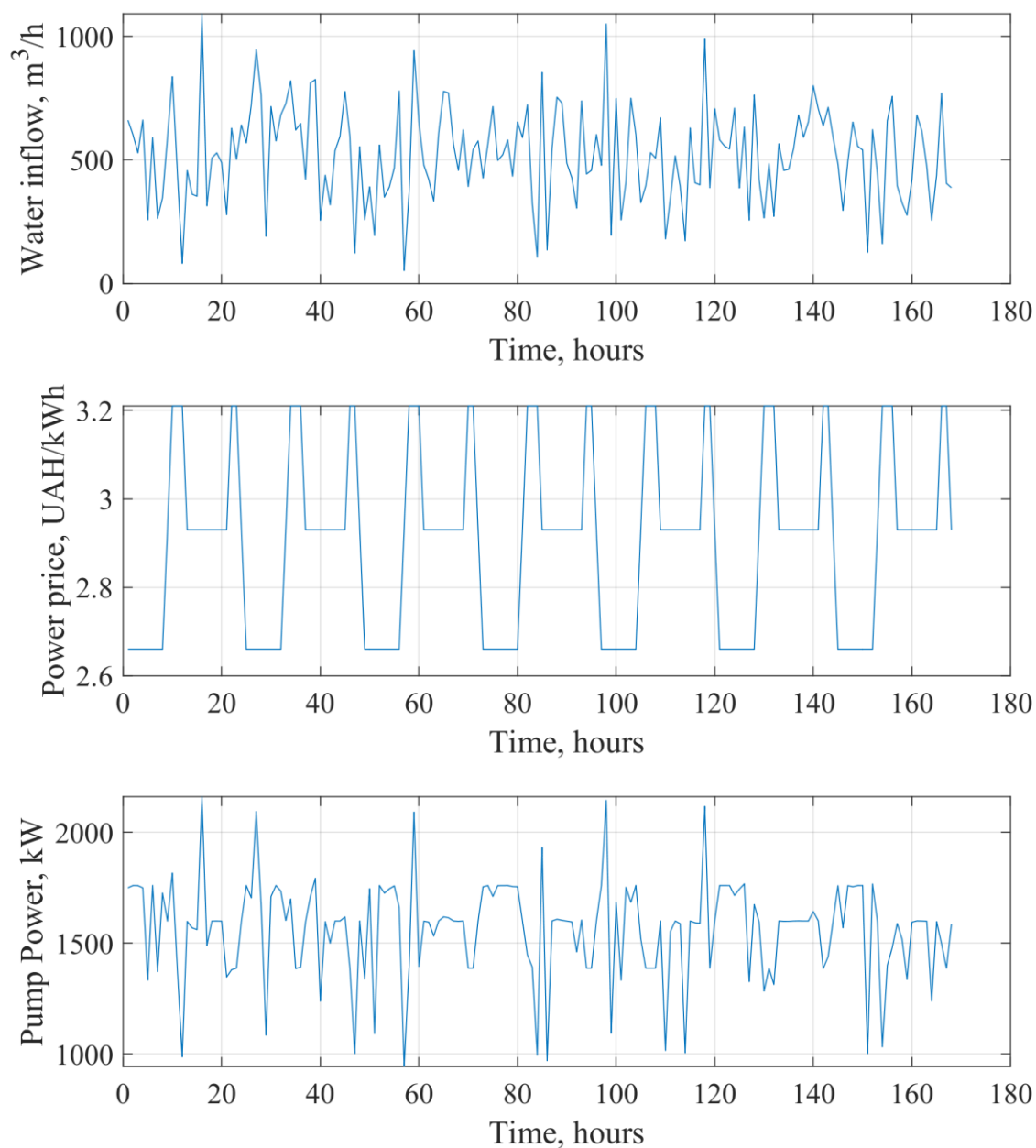


Рисунок 4.9 – Результати моделювання роботи системи керування енергоспоживанням водовідливу на базі алгоритму нечіткого логічного виводу Мамдані з гладкими функціями приналежності та базою правил типу AND протягом 7 діб

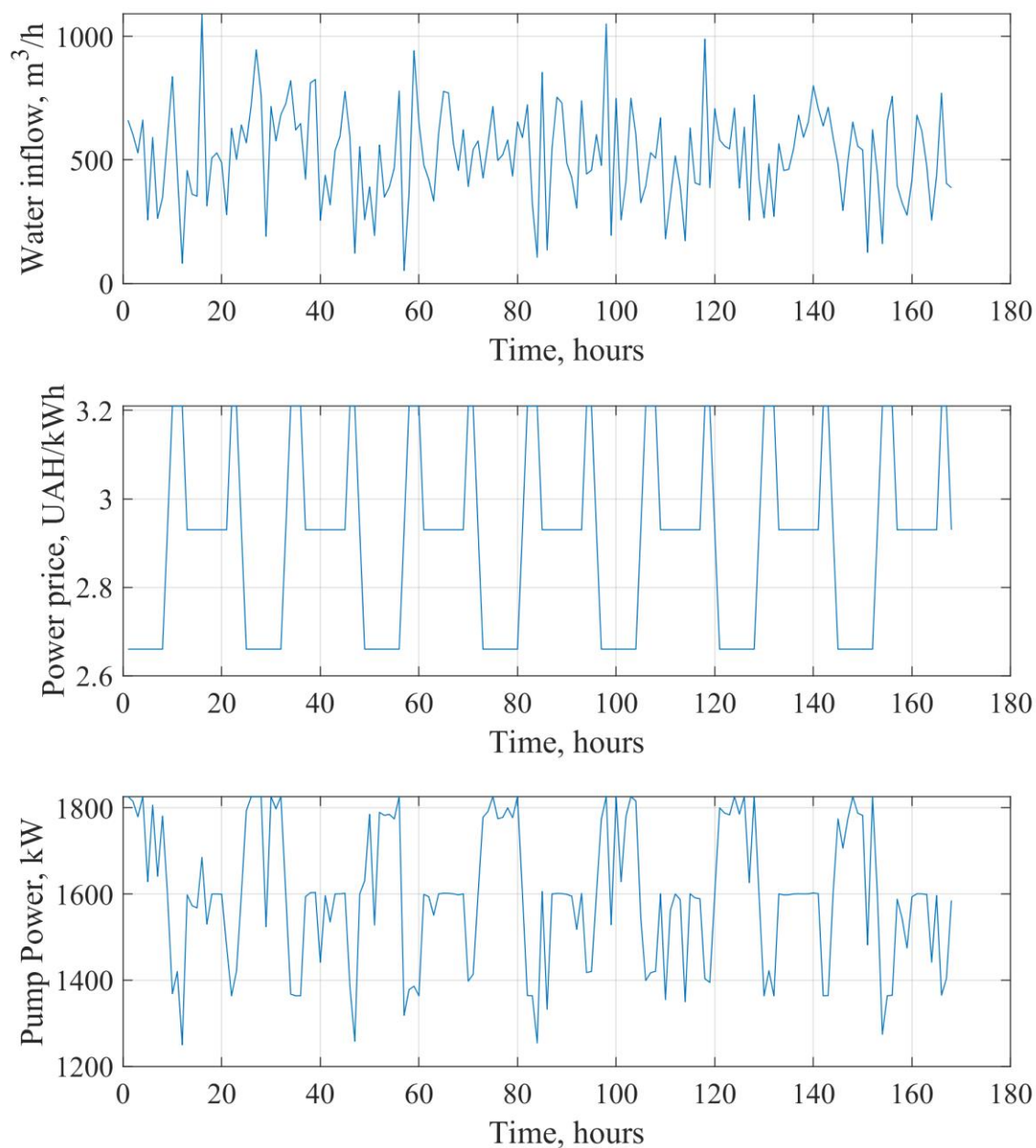


Рисунок 4.10 – Результати моделювання роботи системи керування енергоспоживанням водовідливу на базі алгоритму нечіткого логічного виводу Мамдані з кусково-лінійними функціями приналежності та базою правил типу OR протягом 7 діб

Слід відзначити дві характерні особливості при роботі нечітких систем керування енергоспоживанням водовідливу. Середня потужність агрегатів

горизонту протягом розглянутих періодів роботи практично не відхиляється від значення 1600 кВт. Разом з тим, рівень енергоспоживання систем без керування нижчий в системах із кусково-лінійними функціями приналежності. Це пояснюється тим, що в нечітких системах керування потужність споживається нерівномірно і виникають тривалі періоди, коли водоприплив високий та одночасно в роботі знаходяться три насоси, що призводить до підвищення рівня енерговикористання. Проте, нечіткий алгоритм керування дозволяє підвищити економічну ефективність системи за рахунок перенесення періоду високого енергоспоживання на час дії «нічного» тарифу, тим самим знижуючи загальну вартість отриманої електроенергії.

4.5 Висновки до розділу 4

1. Теоретично обґрунтована і запропонована для практичної реалізації система експертного керування енергоспоживанням шахтними водовідливними комплексами на основі алгоритму нечіткого логічного виводу Мамдані демонструє свою очікувану економічну ефективність, що надає підставу рекомендувати її для впровадження в практику роботи гірничорудних підприємств із підземним способом видобутку залізної руди шляхом проектування та подальшого втілення на аналізованому технологічному об'єкті.

2. Вищу якість керування продемонструвала система з базою нечітких правил типу кон'юнкція. Разом із тим, рівень споживання електроенергії в системі без керування виявляється нижчим через рівномірність розподілу вихідної потужності електромеханічних комплексів насосів протягом доби.

3. Рівень споживання електроенергії в системі без керування виявляється нижчим за систему нечіткого логічного виводу з кусково-лінійними функціями приналежності через рівномірність розподілу вихідної потужності електромеханічних комплексів насосних агрегатів протягом доби.

4. Подальше удосконалення нечітких систем керування полягає в підвищенні енергоефективності, тобто, саме в зниженні обсягів споживання

електроенергії головними водовідливними комплексами шахт, що можна досягнути введенням додаткового обмеження на рівень потужності насосних агрегатів, які працюють одночасно під час фазифікації відповідної лінгвістичної змінної.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційному дослідженні, базуючись на аналізах результатів експериментів в умовах діючих у державі гірничорудних підприємств із підземним способом видобутку залізної руди (шахти, рудники), і теоретичній дослідницькій базі вирішена наукова задача підвищення електроенергоефективності головних водовідливних комплексів даних видів підприємств шляхом розробки системи енергоефективного керування процесом функціонування електромеханічних комплексів цих найбільш енергоємних видів стаціонарних установок.

У результаті наукового пошуку отримано наступні узагальнюючі висновки:

1. Рейтинг рівнів споживання електричної енергії приймачами гірничорудних підприємств із підземним способом видобутку залізної руди – залізорудних шахт, підтвердив існуючий розподіл рівнів споживання даного виду енергії між споживачами, але, водночас, акцентував увагу на постійному зростанні у вищезгаданому комплексі сегмента головних водовідливних комплексів із щорічним рівнем приросту біля 8 %. В той же час доведено, що недостатньо обґрунтовані, проте апріорно втілені в практику роботи ряду гірничорудних підприємств, заходи щодо зменшення або хоча б не підвищення темпів зростання цього показника не дають бажаного рівня ефективності, а, в окремих випадках, взагалі носять негативні наслідки. Між тим, саме головні водовідливні комплекси являють собою генеральне системоутворююче спрямування щодо можливостей втілення в режими їх роботи заходів по збільшенню енергоефективності роботи підземних підприємств у цілому, оскільки саме електромеханічні системи цих комплексів в їх агрегативному складі, на відміну від інших енергоємних споживачів, несуть необхідний для цього потенціал досяжності.

2. Реально підвищити електроенергоефективність гірничорудних підприємств у рамках існуючих технологій видобутку залізної руди шляхом

зменшення рівнів споживання енергії на 1 т видобутку, в тому числі найбільш енергоємних – головних водовідливних комплексів, проблематично і навіть нереально, оскільки природний процес постійного збільшення глибин видобутку даних видів корисних копалин поглинає ті здобутки, які можуть бути досягнуті та досягаються відповідними локального виду заходами в цьому спрямуванні. Вирішення проблеми електроенергоефективності можливе шляхом застосування нових нетрадиційних заходів, у тому числі керуванням процесом розподілу рівнів електроспоживання між енергоємними приймачами та індивідуально окремими з них у годинах доби з обов'язковим урахуванням в управлінських діях комплексу впливових на процес їх функціонування технологічних факторів.

3. Певною перепорою для розробки енергоефективних заходів у технології функціонування залізородних шахт і окремих видів їх споживачів є обмеженість кордонів канонічного формату визначення показника електроенергоефективності в сучасному баченні цього поняття, коли даний показник повинен не стільки свідчити про кількість електроенергії, яка витрачається на видобуток 1 т залізородної сировини, скільки про вплив його на сегмент відсотку витрат у загальному комплексі показників собівартості видобутку даного виду корисних копалин.

4. Визначений як стохастичний характер процесу споживання електроенергії головними водовідливними комплексами притаманний, перш за все, годинам доби, а не іншим часовим визначенням, у значній мірі створено штучно з метою пристосування до погодинних добових тарифів на ЕЕ, але методи реалізації цього принципу не носять необхідного рівня коректності рішень, а сам процес оптимізації рівнів споживання обмежено однокритеріальним підходом, що не відображає в повній мірі режими функціонування як конкретного споживача, так і групи споживачів як складових цілісної технології функціонування залізородної шахти.

5. Для отримання реально енергоефективних режимів функціонування водовідливних комплексів залізородних шахт необхідна розробка

багатофункціонального варіанта структури електромеханічної системи – багаторівневого і структурно агрегативного технологічного комплексу з подальшою реалізацією відповідного алгоритму енергоефективного керування режимами роботи даного споживача згідно з програмою роботи загальношахтної СК електропостачання - електроспоживання в умовах адекватної стартової визначеності факторів впливу, для прийняття відповідних управлінських рішень на основі алгоритму багатокритеріального керування, який характеризується як нечіткий спосіб досягнення мети – підвищення енергоефективності роботи комплексів водовідведення в неканонічному вигляді.

6. Завдяки вдалому поєднанню позитивного нахилу характеристик споживання електроенергії асинхронними двигунами електротехнічних систем насосних агрегатів головних водовідливів і негативному нахилу $Q = f(H)$ характеристик насосів, стартовим варіантом підвищення енергоефективності головних водовідливних комплексів є використання в складі їх електромеханічних систем перетворювачів частоти як бази для керування процесом формування енергоефективних режимів роботи насосних агрегатів привідних двигунів. Поєднання «плаваючих» добових тарифів на електроенергію в комплексі з рекомендованим алгоритмом керування параметрами функціонування електромеханічних комплексів головного водовідведення дозволяє отримати значний ефект від керуваності цим процесом – 8-11 % зменшення електроенерговитрат.

7. Розроблена на основі теоретичних рішень і апробована на моделі та запропонована для практичної реалізації система експертного керування енергоспоживанням головними водовідливними комплексами залізорудних шахт на базі алгоритму нечіткого логічного виводу Мамдані демонструє свою очікувану технологічну й економічну ефективність, що надає підстави рекомендувати її для впровадження на такому енергоємному технологічному об'єкті залізорудних шахт як головний водовідливний комплекс.

8. Удосконалення в процесі подальшого пошуку нечітких систем керування електроспоживанням головних водовідливних комплексів полягає в підвищенні енергоефективності, тобто, зниженні обсягів споживання електроенергії головними водовідливними комплексами, які можна досягти введенням додаткового обмеження на рівень потужності окремо взятих насосних агрегатів, працюючих агрегативно синхронно в періодах часу фазифікації відповідної лінгвістичної змінної.

9. Розроблений формат нечіткої системи керування режимами функціонування головних водовідливних комплексів у реаліях вітчизняних залізорудних шахт на базі алгоритму Мамдані з гладкими функціями приналежності гаусового і сигмоїдного виду та базами правил типу AND і OR визначає очікуваний ефект від їх роботи. Запропонований автором варіант нечіткої системи з базою правил OR дозволить знизити на 0,95 % (на 7413,1 грн) тижневі витрати на електроенергію, а система з базою правил AND знизити ці витрати на 2,65 % (на 20644,8 грн) у порівнянні з некерованим випадком. При цьому, система з базою правил AND забезпечує на 1,71% (або 13231,75 грн) меншу загальну вартість отриманої електроенергії, якщо порівнювати з системою на основі бази правил OR.

10. Матеріали досліджень носять у значній мірі формат універсальності й рекомендуються для використання в практику проектування і подальшого їх використання при розробці систем керування роботою водовідливних комплексів всіх видів та типів гірничовидобувних підприємств, а також інших технологічно споріднених промислових підприємств.

11. Одержані в процесі наукового пошуку результати впроваджено шляхом передачі відповідних матеріалів для їх практичної реалізації спеціалізованим підприємствам із проектування і монтажу систем електропостачання гірничорудних виробництв НВО «Ракурс» (м. Кривий Ріг) та ТОВ «Рудомайн» (м. Кривий Ріг), що підтверджено відповідними актами про впровадження (Додаток Ж). Результати роботи також використовуються в Криворізькому національному університеті на кафедрі електричної інженерії

для навчання здобувачів вищої освіти I-III рівнів за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», що підтверджено актом про впровадження (Додаток Ж).

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1. 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>
2. Стогній, Б. С. та ін. *Основні параметри енергозабезпечення національної економіки на період до 2020 року*. Київ: Ін-т електродинаміки НАН України, 2011.
3. Шиловський, А. К. *Паливно-енергетичний комплекс України на порозі третього тисячоліття*, за редакцією А. К. Шидловського та М. П. Ковалка, Київ: УЕЗ, 2001.
4. Денисюк, С., Таргонський, В. "Енергоефективність України: проблеми та шляхи її зростання." *Енергетика: економіка, технології, екологія. Загальні проблеми енергоефективності*, № 4, 2017, сс. 7-28.
5. Денисюк, С. П. та ін. *Енергетична ефективність України. Крайні проектні ідеї*. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2016.
6. Денисюк, С. та ін. "Європейські тенденції інноваційного розвитку в енергетичному секторі та сферах кінцевого енергоспоживання." *Енергетика: економіка, технології, екологія*, №2(52), 2018, сс. 7-19.
7. Сінчук, І. О. та ін. *Енергозбереження на підприємствах гірничовидобувної промисловості*. Кременчук: ПП Щербатих О. В., 2016.
8. Синчук, О. Н. и др. *Потенциал электроэнергетической эффективности и пути его реализации на производствах с подземными способами добычи железорудного сырья*. Кременчуг: ЧП Щербатых А. В., 2015.
9. Дремин, А. А. "Стратегия энергосбережения при добыче и переработке железных руд." *Горный журнал*, № 12, 2006, сс. 45-47.
10. Sinchuk, O. M. et al. *Aspects of the problem of applying distributed energy in iron ore enterprises' electricity supply systems*. Warszawa: iScience Sp. z. o. o., 2018.

11. Сінчук, О. М. та ін. "Системоутворюючі складові оцінювання рівнів коливань спожитої залізородними підприємствами електроенергії." *Міжнародна науково-технічна конференція "Розвиток промисловості та суспільства"*. Кривий Ріг: Криворізький національний університет, 2023, с. 81.
12. Синчук, И. О. и др. "Электроенергоэффективность производств с подземными способами добычи." *LAP Lamdert Academic Pudlishing*, 2016, с. 351.
13. Sinchuk, O. et al. "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*, no. 14(3), 2020, pp. 101-111.
14. Розумний, Ю., Рухлов, А. *Аспекти вирішення проблеми нерівномірності споживання електричної енергії*. Національний гірничий університет, 2012.
15. Капленко, Ю., Янов, Е. "Влияние глубины горных работ на технико-экономические показатели подземной добычи руды." *Вісник КТУ №5(15)*, 2006, сс. 25-28.
16. Ступнік, М. та ін. "Проблеми розкриття та підготовки рудних родовищ на глибоких горизонтах шахт Кривбасу." *Вісник Криворізького національного університету* вип. 47. Кривий Ріг: Криворізький національний університет, 2018, сс. 3-8, DOI: 10.31721/2306-5451-2018-1-47-3-8.
17. Рябець, В. та ін. "Підготовка та відпрацювання природно-багатих залізородних покладів в умовах глибоких горизонтів." *Міжнародна науково-технічна конференція "Розвиток промисловості та суспільства"*. Кривий Ріг: Криворізький національний університет, Том 1, 2012, с. 3. <http://ds.knu.edu.ua/ispui/handle/123456789/1241>.
18. Сінчук, О. та ін. "Засадничі імперактиви моніторингу енергоорієнтованих режимів споживання електричної енергії на залізородних підприємствах." *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*, № 2, 2022, сс. 24–30, DOI: 10.30929/2072-2052.2022.2.58.24-30, 2022.

19. Sinchuk, O. et al. "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*, no. 15(4), 2021, pp. 25-33.

20. Ялова, А. М., Бауліна, М. А. "Типологія ефективного керування енергоспоживання підприємствами гірничого комплексу." *Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку*, 2014, сс. 72-73.

21. Журахівський, А. В. та ін. *Оптимізація режимів електроенергетичних систем: навчальний посібник*. Львів: Видавництво Національного університету "Львівська політехніка", 2009. ISBN 978-966-553-740-3.

22. *Інтеграція розумних технологій побудови електроенергетичних систем у контексті підприємств гірничо-металургійної галузі*. Звіт за період виконання науково-дослідної роботи з 01.06.2021 р. по 31.12.2021 р. (згідно з договором № 30-114-21), 2021.

23. *Аспекти теорії та практики оцінки електроенергетичної конкурентноспроможності залізрудних підприємств*. НР/П-84-18. Звіт з науково-дослідної роботи (заключний), 2018.

24. *Розроблення енергозберігаючих заходів на підприємствах гірничодобувної промисловості*. Звіт з науково-дослідної роботи № 30-102-15 (проміжний), 2015.

25. *Дослідження екологічного стану території пост-майнінгу в Україні на прикладі Криворізького басейну та його оточення*. НАН України, Інститут телекомунікацій і глобал. інформ. простору, Центр проблем морської геології та осадкового рудоутворення. Київ: Ніка-Центр, 2021.

26. Сінчук, І. О. *Методологічні засади оцінювання електроенергоефективності залізрудних підприємств*. Кременчук: ПП Щербатих О.В., 2019.

27. Сінчук, І. О. *Коментар до стану енергоефективності залізрудних підприємств як сегмента їх конкурентноспроможності*. Кременчук: ПП Щербатих О.В., 2018.

28. Паневчик, В. В. и др. *Основы энергосбережения: практикум*. Минск: БГЭУ, 2007.

29. Системи енергетичного менеджменту. Вимірювання рівня досягнутої / досяжної енергоефективності з використанням базових рівнів енергоспоживання та показників енергоефективності. Загальні положення та настанова. ДСТУ ISO 50006:2016. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2016.

30. Тищенко, А. Н. и др. *Экономическая результативность деятельности предприятий*. Харьков: ИД ИНЖЭК, 2005.

31. Чорноус, Г. О. *Проактивне управління соціально-економічними системами на основі інтелектуального аналізу даних. Методологія і моделі*. Київ: ВЦП "Київський університет", 2014.

32. Budnikov, K. et al. "Modelling basic parameters to control a local power complex of water drainage facilities at iron ore mines." *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*, no. 1, 2022, pp. 33–38, DOI: 10.30929/2072-2052.2022.1.57.33-38.

33. Купін, А. І. *Інтелектуальна ідентифікація та керування в умовах процесів збагачувальної технології*. Кривий Ріг: Видавництво КТУ, 2008. ISBN 966-7599-56-0.

34. Про затвердження кодексу комерційного обліку електричної енергії. Постанова НКРЕКП від 14.03.2018 № 311. URL:<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0311874-18#Text>

35. Про затвердження правил ринку «на добу наперед» та внутрішньодобового ринку. Постанова НКРЕКП від 14.03.2018 № 308. URL:<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0311874-18#Text>

36. Берідзе, Т. М. та ін. *Фондовий ринок: функціонування та розвиток*. Кременчук: NoovaBook, 2018. ISBN 978-617-639-172-2.

37. Закон України "Про ринок електричної енергії." Верховна Рада України. Законодавство України: URL:<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2019-19#Text>.

38. Паливно-енергетичні баланси промислових підприємств. Методи побудови та аналізу. ДСТУ 4714:2007. Київ: Держспоживстандарт України, 2007.

39. Методи визначення норм витрачання електроенергії гірничими підприємствами. ДСТУ 3224 – 95. Київ: Держстандарт України, 1995.

40. Номенклатура показників енергоефективності та порядок їхнього внесення у нормативну документацію. ДСТУ 3755 – 98. Київ: Держстандарт України, 1999.

41. Енергозбереження. Основні положення. ДСТУ 2339 – 94. Київ: Держстандарт України, 1994.

42. Тарифи на послуги з розподілу електричної енергії. ДТЕК Дніпровські Електромережі. 23.11.2022. URL: <https://www.dtek-dnem.com.ua/ua/services-tariffs>

43. Денисюк, С. П. *Цілі стандарту та особливості його впровадження в Україні: навчальний посібник*. Київ: ТОВ «СІК ГРУП УКРАЇНА», 2015.

44. Щетка, В. Ф. и др. *Исследование эффективности и безопасности электрооборудования и системы электроснабжения на горных предприятиях*. Отчет по научно-исследовательской работе (заключительный). Кривой Рог, 1980.

45. Щетка, В. Ф. и др. *Разработка и внедрение высокоэффективных систем электроснабжения шахт с переходом на большие глубины в условиях интенсификации горных работ, увеличения единичных мощностей и использования тиристорных преобразователей*. Отчет по научно-исследовательской работе (промежуточный). Кривой Рог, 1980.

46. Щетка, В. Ф. и др. *Разработка и внедрение высокоэффективных систем электроснабжения шахт с переходом на большие глубины в условиях интенсификации горных работ, увеличения единичных мощностей и использования тиристорных преобразователей*. Отчет по научно-исследовательской работе (заключительный). Кривой Рог, 1981.

47. Щетка, В. Ф. и др. *Исследование и оптимизация режимов работы электрооборудования, систем электроснабжения шахт и горнообогатительных комбинатов при увеличении единичных мощностей приводов и использовании тиристорных преобразователей*. Отчет по научно-исследовательской работе (заключительный). Кривой Рог, 1981.

48. Данильчук, Г. и др. *Автоматизация электропотребления водоотливных установок*. Киев: Техника, 1981.

49. Наннес, Ю. и др. "О требованиях по шахтному водоотливу новых ПТЭ и подготавливаемых ПБ". *Уголь Украины* 5, 2008, сс. 15-17.

50. Ященко, А. Э. и др. "Управление электропотреблением водоотливных установок: Механизация и автоматизация управления." *Вестник КПИ*, № 3, 1979, сс. 30-33.

51. Ященко, А. "Рациональный суточный график работы шахтной водоотливной установки." *Уголь Украины*, 2005, сс. 7-12.

52. Разумний, Ю. та ін. "Умови ефективного регулювання режимів електроспоживання головним водовідливом шахт." *Науковий вісник НГУ*, № 1, 2010, сс. 17-22.

53. Давиденко, Л. В. та ін. *Формування енергоефективних режимів насосних станцій комунального водопостачання: монографія*. Луцьк: ІВВ Луцького НТУ, 2018. ISBN 978-617-672-194-9.

54. Шевчук, С. П. "О влиянии внепикового управления электропотреблением водоотлива горных предприятий на допустимое время перерыва в его работе." *Вестник КПИ "Серия горной электромеханики и автоматики"*, № 23, 1992, сс. 34-38.

55. Холоменюк, М. В. *Насосні та вентиляторні установки: навч. посіб.* Дніпропетровськ: Нац. гірн. ун-т, 2004.

56. Тимухин, С. А. и др. "О необходимости более полного учета максимальных притоков воды в проектных решениях комплексов главного водоотлива." *Известия УГГУ*, том 4, № 40, 2015, сс. 41-45.

57. Ященко, А. "Пути повышения экономичности работы водоотливных комплексов." *Уголь Украины*, № 4, 2004, сс. 29-32.

58. Бессараб, В. и др. "Управление шахтной водоотливной установкой в аварийных и аномальных режимах работы." *Наукові праці ДонНТУ* № 106, РВК ДонНТУ. Донецьк, 2006, сс. 26-33.

59. Грядущий, Б. и др. "Современное состояние и пути дальнейшего развития главных водоотливных и вентиляторных установок шахт." *Наукові праці ДонНТУ* № 22, РВК ДонНТУ. Донецьк, 2011, сс. 60-65.

60. Пивняк, Г. Г. и др. "Энергоэффективность комплекса шахтного водоотлива." *Електротехнічні та комп'ютерні системи*, № 3, 2011, сс. 394-396.

61. Разумный, Ю. и др. "Повышение энергоэффективности главной водоотливной установки угольной шахты." *Научный вестник НГУ*, № 5, 2013, сс. 67-72.

62. Рухлов, А., Рухлова, Н. "Технологические условия работы главного водоотлива в режиме эффективного потребителя регулятора." *Уголь Украины*, № 12, 2014, сс. 34-37.

63. Розен, В. П., Великий, С. С. "Загальна модель погоризонтного шахтного водовідливу." *Вісник Криворізького національного університету: Збірник наукових праць*, вип. 46, Кривий Ріг, 2018, сс. 56-60.

64. Толмачов, С. Т. "Оптимізація режимів роботи насосних установок головного водовідливу шахт за критерієм мінімуму вартості електроенергії." *Вісник Криворізького національного університету: Збірник наукових праць*, вип. 44, Кривий Ріг, 2017, сс. 137-142.

65. Разумный, Ю. та ін. "Енергоефективна робота водовідливної установки вугільної шахти." *РВК НГУ: Науковий вісник НГУ*, 2015, сс. 74-79

66. Tytiuk, V. et al. "Control of the start of high-powered electric drives with the optimization in terms of energy efficiency." *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, no. 5, 2020, pp. 101-108.

67. Тытюк, В. К. и др. "Исследование водоотливной установки шахты на виртуальном исследовательском комплексе с использованием мультифизического моделирования в MATLAB." *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*, вип. 2/2019 (46), Кременчук, 2019, сс. 42-48.

68. Davydenko, L. et al. "Neural Networks application for power consumption planning of the water supply facilities." *2020 IEEE Conference of Electrical, Electronic and Information Sciences, eStream 2020*. Proceedings. Vilnius, Lithuania, 2020, pp. 1-4, DOI:10.1109/eStream50540.2020.9108856.

69. Тытюк, В. К. "Система автоматизованого керування гідротранспортною системою зі стабілізацією тиску." *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*, вип. 4/2021 (56), Кременчук: КрНУ, 2020, сс. 25-33.

70. Maregedze, L. et al. "Use and cost optimization for underground mines electrical energy: A case of a mine in Zvishavane." *Energy*, vol. 247, May 2022, 123374, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123374>.

71. He, Y. et al. "Lifecycle risk assessment on the sustainable development of upgrading energy projects using abandoned mines: An ISM-BWM method." *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 54, December 2022, 102833, <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102833>.

72. Bhimaraju, A. et al. "Feasibility of solar photovoltaic/grid-connected hybrid renewable energy system with pumped storage hydropower system using abandoned open cast coal mine: A case study in India." *Journal of Energy Storage*, vol. 72, Part A, November 2023, 108206, <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.108206>.

73. Matas Escamilla, A. et al. "Mine water as a source of energy: an application in a coalfield in Laciana Valley (León, NW Spain)." *Clean Technologies and Environmental Policy*, vol. 25, May 2023, pp.2747-2760, DOI:10.1007/s10098-023-02526-y.

74. Tomiyama, S., Igarashi, T. "The potential threat of mine drainage to groundwater resources." *Current Opinion in Environmental Science & Health*, vol. 27, June 2022, 100347, <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2022.100347>.

75. Michłowicz, E., Wojciechowski, J. "Energy consumption analysis of the main dewatering pumps in underground mines." *Mining-informatics, automation and electrical engineering*, vol., no. 2 (546), 2021, pp. 47-54, DOI: 10.7494/miag.2021.2.546.47.

76. Sang, J., Cui, H. "Energy saving schedule of mine drainage system based on particle swarm optimization." *Journal of Physics: Conference Series*, vol.1168, 2019, DOI: 10.1088/1742-6596/1168/2/022001.

77. Sang, J. "A cost-effective pump scheduling method for mine drainage system based on ant colony optimization." *Journal Europeen des Systemes Automatises*, vol. 52, no. 2, 2019, pp. 123-128, DOI: 10.18280/jesa.520202.

78. Ren, Z., Jiahao, H. "Energy Saving Control Research on Mine Drainage System Based on Model Predictive Control." *Journal of System Simulation* vol. 27, no. 12, 2015, pp. 3032-3036.

79. Pujades, E. et al. "Underground pumped storage hydropower plants using open pit mines: How do groundwater exchanges influence the efficiency?" *Applied Energy*, vol. 190, 2017, pp. 135-146.

80. Alvarez, H. et al. "Mine Water for the Generation and Storage of Renewable Energy: A Hybrid Hydro-Wind System." *Int. J. Environ. Res. Public Health*, no. 18(13), 2021, p. 6758, <https://doi.org/10.3390/ijerph18136758>

81. Nel, W. "The power of the worked-out mine: Conceptual designs for mine based pumped-storage hydroelectricity." *MPES 2015 - Smart Innovation in Mining*, 2015, <https://www.researchgate.net/publication/283643054>.

82. Menendez, J., Loredo, J. "Use of abandoned underground mines for construction of pumped-storage hydro power plants and their influence on the electrical system." *XIV International Congress on Energy and Mineral Resources*, 2018.

83. Soni, A. K., Wolkersdorfer, Ch. "Mine water: Policy perspective for improving water management in the mining environment with respect to developing economies." *Int. J. Min. Reclam. Environ*, no. 30(2), 2016, pp. 115-127, DOI:10.1080/17480930.2015.1011372.

84. Сорока, Л. І., Кальчук, І. В. *Випадкові процеси: методичні рекомендації*. Луцьк: Східноєвропейський національний університет ім. Л. Українки, 2013.

85. Новицький, І. В., Ус, С. А. *Випадкові процеси*. Дніпропетровськ: Національний гірничий університет, 2011.

86. Шелпунов, В. І. та ін. *Теорія випадкових процесів та її використання в економічних дослідженнях*, за редакцією О. М. Сінчука, Київ: Наукова думка, 2004.

87. Плешков, А. Г. та ін. *Енергетичний інжиніринг та менеджмент: в 3-х ч. Ч.1. Проектування ефективних енергетичних систем*. Кропивницький: ЦНТУ, 2018.

88. Vodovozov, V., Raud, Z. "Predictive control of multi-pump stations with variable-speed drives." *IET Electric Power Applications*, vol. 11, no. 5, 2017, pp. 911-917, DOI: 10.1049/iet-epa.2016.0361.

89. Vodovozov, V. et al. "PLC-Based Pressure Control in Multi-Pump Applications." *Electrical, Control and Communication Engineering*, vol. 9, no. 1, Dec. 2015, pp. 23-29, DOI: 10.1515/ecce-2015-0008.

90. Wang, H. et al. "Optimization of Pump StartUp Depth in Drainage Pumping Station Based on SWMM and PSO." *Water* vol. 11, no. 5, May 2019, DOI: 10.3390/w11051002.

91. Yussif, N. et al. "Enhanced Quadratic V/f-Based Induction Motor Control of Solar Water Pumping System." *Energies* vol. 14, no. 1, Jan. 2021, DOI: 10.3390/en14010104.

92. Sinchuk, O. et al. "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, 2021, pp. 341-353, <https://doi.org/10.15276/hait.04.2021.5>

93. Сінчук, О. та ін. *Стартові позиції до підвищення електроенергоефективності головних відливних комплексів залізородних*

шахт: монографія, за редакцією О. Сінчука, Кременчук: ПП Щербатих О. В., 2023.

94. Будніков, К. В. та ін. "Теоретичні імперативи енергоефективності залізородних підприємств." *Всеукраїнська науково-практична конференція студентів та молодих учених "Актуальні питання енергоефективності гірничо-металургійного виробництва"*, 25-27 листопада, 2021 р., Криворізький національний університет, сс. 26-27

95. Sinchuk, I. et al. *Fundamentals of integrating smart technologies for controlling power systems at iron ore underground mining enterprises*. Monograph. Warsaw: iScience Sp.z.o.o., 2021. ISBN 978-83-66216-50-1.

96. Beridze, T. M., Lokhman, N. V. "Forming of administrative model of strategic development of enterprise is on principles of statistical monitoring." *Sciences of Europe*, vol. 1, no. 17, 2017, pp. 7-11.

97. Охріменко, М. Г., Дзюбан, І. Ю. *Методи дослідження операцій*. Київ: Політехніка, 2005.

98. Єгоршин, О. О., Малярець, Л. М. *Математичне програмування*. Харків: ВД ІНЖЕК, 2006.

99. Sinchuk, O. et al. "Methods of improving power indices of electric drive active rectifiers for mine hoists." *Second International Conference on Sustainable Futures: Environmental, Technological, Social and Economic Matters (ICSF 2021)*, vol. 280, 2021, DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128005014>

100. Korobiichuk, I. et al. "Control of the Operation Mode of the Production Facility Based on the Relevant Characteristics of the Technological Process." *Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol. 1140, 2020, pp. 57-66, DOI:10.1007/978-3-319-48923-0_24.

101. Шевчук С. П. *Насосні, вентиляторні та пневматичні установки: підручник*. НТТУ «КПІ», 2010.

102. Червінська Н. В. "Прогнозування швидкості припливу при управлінні комплексом шахтного водовідливу." *Вісник Хмельницького національного університету*, №4, 2012, сс. 18-22.

103. Sinchuk, O. et al. "Development of the functional model to control the levels of electricity consumption by underground iron-ore enterprises." *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 6/3(96), 2018, pp. 77-84.

104. Sinchuk, O. et al. "Mathematical model to assess energy consumption using water inflow-drainage system of iron-ore mines in terms of a stochastic." *Mining of Mineral Deposits*, vol. 16, no. 4, 2022, pp. 19-28, DOI:10.33271/mining16.04.019.

105. Bratkovska, K., Shram, A. "Improving the Accuracy of Estimating the Power Consumption Efficiency in Industry." *KhPI Week on Advanced Technology (2021 IEEE KhPI Week): IEEE International Conference*. Kharkiv, Ukraine, September 13-17, 2021, pp. 439-444.

106. Sinchuk, O. et al. "Model studies to identify input parameters of an algorithm controlling electric supply/consumption process by underground iron ore enterprises." *Mining of Mineral Deposits* vol. 17, no. 3, 2023, pp. 93-101, DOI: 10.33271/mining17.03.093.

107. Budnikov, K. V. et al. "Modeling tools for improving energy efficiency of water drainage complexes at iron ore underground mines." *Herald of Advanced Information Technology* vol. 5, no. 1, 2022, pp. 40-51, DOI: 10.15276/hait.04.2022.4.

108. Будніков, К. В. *Варіативність систем енергоефективного функціонування комплексів водовідведення в структурах електричних мереж залізородних шахт*. Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії, 2022. Кривий Ріг: КНУ.

109. Верес, О. М. та ін. *Технології підтримки процесів прийняття рішень: підручник*. Львів: Новий світ-2000, 2023.

110. Morkun, V. S., Kotov, I. A. "Knowledge base formation for automation of dispatch control over power systems of the mining and metallurgical complex." *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. Dnipropetrovsk: Ukraine, no 4, 2021, pp. 103-109.

111. Барановський, В. Д. та ін. "Дослідження потенціалу енергозбереження шахтної водовідливної установки засобами регульованого електроприводу." *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*, вип. 1/2022 (57), 2022, сс. 16–24, DOI: 10.30929/2072-2052.2022.1.57.16-24.

112. Забезпечення контролю і дотримання показників якості електричної енергії у процесі її передачі магістральними та міждержавними електричними мережами. ДІ «НЕК УКРЕНЕРГО», СОУ НЕК 03.120.4 - 14:2019. Київ, 2019.

113. Сінчук, О. М. та ін. *Сучасний ринок електричної енергії: Підручник. Курс лекцій*. Кременчук: ПП Щербатих О. В., 2021.

114. Arun Shankar et al. "A comprehensive review on energy efficiency enhancement initiatives in centrifugal pumping system." *Applied Energy*, vol. 181, 2016, pp. 495-513.

115. Лезнов, Б. С. *Экономия электроэнергии в насосных установках*. Москва: Энергоатомиздат, 1991.

116. Коренькова, Т. В. *Автоматизований електропривод насосних та вентиляторних установок у задачах енергоресурсозбереження*. Кременчук: ПП Щербатих О. В., 2012.

117. Маренич, К. М. та ін. *Автоматизований електропривод машин і установок шахт і рудників: навчальний посібник*. Донецьк: ДВНЗ «Дон НТУ», 2012.

118. Титюк, В. К. та ін. *Оптимізація пускових режимів потужних електроприводів за енергетичною ефективністю: монографія*. Кременчук: ПП Щербатих О. В., 2022.

119. Morkun, V. S., Kotov, I. A. "Information technologies for power supply dispatch control based on linguistic corpus ontologies." *Науковий Вісник Національного гірничого університету: зб. наук. праць*. Дніпро: НТУ «Дніпровська політехніка», № 6 (174), 2019, сс. 130-136.

120. Загірняк М. В. *Електричні машини: підручник*. Київ: Знання. 2009.

121. Вольдек, А. И. *Электрические машины: учебник для студентов высш. техн. учебн. заведений*. Ленинград: Энергия, 1978.

122. Кучерук, І. М. та ін. *Загальний курс фізики. (у 3-х томах). Том 1. Механіка. Молекулярна фізика і термодинаміка*, за редакцією проф. І. М. Кучерука, Київ: Техніка, 2006.

123. Singh, A. K. et al. "Intelligent Control of Irrigation Systems Using Fuzzy Logic Controller." *Energies*, vol. 15, no. 19, Jan. 2022, DOI: 10.3390/en15197199.

124. Studzinski, J., Ziotkowski, A. "Control of Pumps of Water Supply Network under Hydraulic and Energy Optimisation Using Artificial Intelligence." *Entropy*, vol. 22, no. 9, Sep. 2020, DOI: 10.3390/22091014.

125. Suwongsa, T. et al. "Energy Saving Approach for an Electric Pump Using a Fuzzy Controller." *Energies*, vol. 14, no. 11, Jan. 2021, DOI:10.3390/en14113330.

126. Sinchuk, I. et al. "Developing the algorithm for the smart control system of distributed power generation of water drainage complexes at iron ore underground mines," *IEEE 8th International Conference on Energy Smart Systems (ESS)*, Oct. 2022, pp. 116-122, DOI: 10.1109/ESS57819.2022.9969263.

127. Сінчук І. О. *Базові засади форматизації структури і алгоритму функціонування автоматизованої системи управління електроенергопотокami залізорудних шахт*. Кременчук: ПП Щербатих О. В., 2019.

128. Sinchuk, I. O. et al. *Efficiency of creating "peak" pumped - storage power plants based on water drainage complexes of underground mines*. Warsaw: iScence Sp. z.o.o., 2022.

129. Baranovskyi, V. *Starting positions to improve energy efficiency of main water drainage facilities of iron ore underground mines: Monograph*. Supervised by Doctor of Sciences (Engineering), Professor Sinchuk O. Warsaw: iScience Sp. z.o.o., 2023. ISBN 978-83-66216-83-9.

130. Sinchuk, I. et al. *Preventive theses to options for developing smart control systems for power flows distribution among consumers of iron ore underground mines: Monograph*. Warsaw: iScience Sp. z.o.o., 2023.

131. Будніков, К. В. та ін. "Нечітка система керування процесами «енергопостачання-енергоспоживання» в енергосистемах залізрудних шахт з розподіленою генерацією." *Гірничий вісник*, вип. 110, 2022, сс. 118-126.

132. Sinchuk, O. et al. "Algorithms Design for Fuzzy Control by Power Streams in Conditions of Underground Extraction of Iron Ore." *IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems, ESS*, 2020, pp. 330-334.

133. Athari, M. H., Ardehali, M. M. "Operational performance of energy storage as function of electricity prices for on-grid hybrid renewable energy system by optimized fuzzy logic controller." *Renewable Energy*, no. 85 (2016), pp. 890-902.

134. Baranovskyi, V. et al. "Improving the energy efficiency of a mine drainage installation by means of an industrial electric drive", *2022 IEEE 3rd KhPI Week on Advanced Technology (KhPI Week)*, October 03-07, 2022, pp. 541-545.

135. Sinchuk, O. et al. "Simulation Version of Evaluating Corporate Power Consumption by Consumers of Iron Ore Mines Using Nonlinear Optimization Means." *IEEE 4th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES)*, October 20-22, 2022, Kremenchuk, Ukraine, pp. 16-24, DOI:10.1109/mees58014.2022.10005744

136. Mykhailenko, O. et al. "Power consumption control of multi-pump systems of the main water drainage in underground mines based on the Mamdani fuzzy inference system." *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (ICSF 2023)*, vol. 1254, Article 012046, DOI:10.1088/1755-1315/1254/1/012046.

137. Чорний, О. П. та ін. "Параметрична та чисельна стійкість розв'язків математичної моделі синхронного двигуна при невизначеності його параметрів та їх вплив на розрахунки динамічних режимів." *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*, № 1 (45), 2019, сс. 25-39.

138. Rycroft, M. "Small pumped water storage systems: a new partner for renewable energy?" *Technology&business for development*, 2017. <https://www.ee.co.za/article/small-pumped-water-storage-systems-new-partner-renewable-energy.html>

139. Петергеря, Ю. С. та ін. *Інтелектуальні системи забезпечення енергозбереження житлових будинків: Навчальний посібник*. Київ: Медіа-ПРЕС, 2008.

140. Щокін, В. П. *Інтелектуальні системи керування: аналітичний синтез та методи дослідження*. Кривий Ріг: Д. О. Чернявський, 2010.

141. Шевченко, А. І. та ін. *Стратегія розвитку штучного інтелекту в Україні: монографія*, за заг. редакцією А. І. Шевченка, Київ: ІПШІ, 2023.

142. Кононов, Б. Т. та ін. *Електричні машини: підручник*, за редакцією Б. Т. Кононова, Харків: ХУПС, 2015.