

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЗАПОРІЗЬКА ПОЛІТЕХНІКА»
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

ЮСЬКІВ ОЛЕСЯ ІГОРІВНА

УДК 004.09:519.7:669.1

**МЕТОДИ, МОДЕЛІ ТА ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ АНАЛІЗУ
ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ МЕТАЛУРГІЙНОГО ПІДПРИЄМСТВА**

124 – Системний аналіз

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії
Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело



О.І. Юськів

Науковий керівник

Бакурова Анна Володимирівна, доктор економічних наук, професор

Науковий керівник

Кійко Сергій Геннадійович, доктор технічних наук, доцент, Голова правління

ПрАТ «ДНІПРОСПЕЦСТАЛЬ»

АНОТАЦІЯ

Юськів О.І. Методи, моделі та інформаційна технологія аналізу енергозбереження металургійного підприємства. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 124 – «Системний аналіз» – Національний університет «Запорізька політехніка», Запоріжжя, 2025.

Дисертаційне дослідження присвячено розробці моделей, методів, які забезпечать вирішення науково-практичної проблеми управління процесами енергозбереження на електрометалургійному підприємстві з урахуванням динаміки виробничих процесів, стратегічних цілей та ризиків, що дасть змогу підвищити конкурентоспроможність підприємства. Вирішення цієї проблеми пов'язане з розв'язанням протиріччя між необхідністю реалізації програм енергозбереження на металургійних підприємствах і недосконалістю науково обґрунтованих засобів досягнення цієї мети у вигляді моделей і методів управління процесами енергозбереження, у яких повною мірою не враховуються всі інформаційні потоки динаміки виробничих процесів.

Об'єктом дослідження є процес енергозбереження на металургійних підприємствах.

Предметом дослідження є методи, моделі та інформаційна технологія аналізу енергозбереження на металургійних підприємствах.

Мета досліджень полягає у розробці моделей, методів та інформаційної технології аналізу енергозбереження на металургійних підприємствах, які забезпечать вирішення науково-практичної проблеми управління процесами енергозбереження з урахуванням динаміки енергоспоживання, економічних та екологічних ризиків.

Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків.

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційного дослідження, наведено мету, об'єкт та предмет дослідження. Також у вступі описано зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами; наведено методи дослідження та відображено практичне значення одержаних результатів дослідження; презентовано списки опублікованих праць за тематикою дисертаційної роботи та конференцій, на котрих було апробовано основні результати дисертаційної роботи.

У першому розділі «Формування концепції дослідження проблеми енергозбереження на металургійних підприємствах» проаналізовано сучасний стан металургійного комплексу в Україні та досліджено проблеми енергозбереження на основі системного підходу. Також сформована концепція дослідження проблеми енергозбереження металургійного підприємства.

У другому розділі «Методологія аналізу процесів енергоспоживання на підприємствах металургійної промисловості» здійснено аналіз сукупності факторів, що впливають на енергозбереження металургійного підприємства – екологічні ризики, аналіз економічних витрат та вплив метеофакторів на енергоспоживання на металургійних підприємствах. Описано методи енергетичного обстеження на металургійних підприємствах для пошуку шляхів підвищення енергозбереження. Запропоновано метод енергетичного обстеження на металургійному підприємстві на прикладі проведення експрес-аудиту.

У третьому розділі «Моделювання заходів енергозбереження на металургійному підприємстві» розв'язано актуальне завдання вибору оптимальних моделей для вирішення задачі енергозбереження на металургійному підприємстві. Запропоновано метод прогнозування добового енергоспоживання на металургійних підприємствах за допомогою нейронних мереж, що забезпечує збільшення точності прогнозування і, як наслідок, є засобом енергозбереження. Запропоновані та досліджені економетричні моделі оцінки впливу метеофакторів (температури, освітленості) на процес енергоспоживання. Застосовано метод рекурентного аналізу до процесу енергоспоживання на металургійних підприємствах, для пояснення його нелінійної динаміки. Здійснено аналіз енергоспоживання за допомогою рекурентних діаграм за наявності шуму. В

процесі дослідження програмно розраховано кількісні показники аналізу рекурентних діаграм, за допомогою яких було виявлено закономірності та отримано інформацію про властивості досліджуваної системи.

У четвертому розділі «Система моніторингу ризиків як інформаційна технологія аналізу і підвищення енергоефективності металургійного підприємства» – на основі розглянутих в попередніх розділах методах та моделях розроблено інформаційну технологію, яка поєднує всі попередні результати на основі сформованої концепції в єдину систему моніторингу та виконано експериментальні дослідження розроблених методів прогнозування на добу вперед, здійснено аналіз фактичного та прогнозованого значення енергоспоживання влітку та взимку, зроблено розрахунки відхилень прогнозованого значення від нормованого показника та розраховано економічний ефект від проведеного прогнозування енергоспоживання.

Для досягнення мети необхідно було виконати **такі завдання**.

1. Розробити концепцію підвищення енергозбереження на металургійному підприємстві, що акцентує використання інформаційних технологій (розділ 1.3).

2. Обґрунтувати необхідність енергоаудиту для пошуку шляхів енергозбереження та визначення напрямів ефективного енергоспоживання (розділ 2.2)

3. Побудувати моделі прогнозування електроспоживання для металургійного підприємства на основі нейронних мереж з метою підвищення точності прогнозування (розділ 3.1)

4. Дослідити вплив метеофакторів (температури, освітленості) на процеси енергоспоживання металургійних підприємств, за допомогою побудови економетричних моделей (розділ 2.2)

5. Дослідити складність динаміки енергоспоживання металургійних підприємств шляхом побудови рекурентних діаграм (розділ 3.2, 3.3)

6. Удосконалити інформаційну технологію моніторингу еколого-економічних ризиків металургійних підприємств (розділ 4)

Наукова новизна роботи.

1. Вперше розроблена концепція підвищення енергозбереження на металургійному підприємстві на основі інформаційної технології управління процесами енергозбереження, яка ґрунтується на аналізі динаміки енергоспоживання, економічних та екологічних ризиків.

2. Набула подальшого розвитку технологія експрес-енергоаудиту на основі даних про погодинне енергоспоживання, що враховує цінові зони день-ніч на металургійному підприємстві та дає можливість скорочувати енергоспоживання у денні часи.

3. Набув подальшого розвитку метод зниження загальної похибки прогнозування електроспоживання для металургійного підприємства за рахунок використання штучного інтелекту у вигляді моделей нейронних мереж, що дає можливість скоротити розбіжність між прогнозованим та фактичним енергоспоживанням.

4. Набуло подальшого розвитку оцінювання впливу метеофакторів на процеси енергоспоживання металургійних підприємств з метою врахування кліматичних змін за рахунок застосування багатофакторного економетричного моделювання.

5. Отримав подальшого розвитку метод аналізу нелінійної динаміки енергоспоживання металургійного підприємства за рахунок побудови рекурентних діаграм часових рядів, що дасть змогу підвищити передбачуваність енергоспоживання в умовах різного навантаження обладнання.

6. Вдосконалено інформаційну технологію моніторингу еколого-економічних ризиків металургійних підприємств за рахунок розробки інфологічної моделі аналітичної панелі, що уможливорює візуалізацію відхилень від нормативних показників та відповідне оперативне реагування.

Практична значимість отриманих результатів. Розроблено аналітичну панель для моніторингу та прогнозування ризиків перевитрат енергоспоживання оскільки підвищення енерговитрат призводить до підвищення екологічних ризиків підприємства металургії. Аналітична панель автоматизує роботу з даними:

а) здійснюється моніторинг споживання електроенергії впродовж доби;

б) здійснюється аналіз абсолютного споживання електроенергії за добу;

в) здійснюється прогнозування абсолютного значення споживання електроенергії.

Запропонована модель системи моніторингу призначена для ідентифікації та управління економічними ризиками металургійного підприємства з метою підвищення оперативної дієвості. Екологічні ризики для металургійного підприємства є результатом його діяльності, і в деякій мірі залежать від величини енергоспоживання, яке в свою чергу, залежить від об'єму випущеної продукції. Чим більший об'єм випущеної продукції тим більші екологічні викиди шкідливих речовин, що при перевищенні ГДВ може призвести до додаткових економічних збитків у вигляді штрафів.

Наукові положення, висновки і рекомендації, викладені в дисертаційній роботі, використано при підготовці дисциплін «Інтелектуальні системи підтримки прийняття рішень», «Аналіз часових рядів», «Системний аналіз соціально-економічних процесів» та НДР на кафедрі системного аналізу та обчислювальної математики Національного університету «Запорізька політехніка» (акт впровадження від 27.02.2025). Результати дисертаційної роботи апробовано та впроваджено у практичну діяльність ПрАТ «ДНІПРОСПЕЦСТАЛЬ» (акт впровадження від 22.05.2024).

Ключові слова: енергоспоживання, моделювання. металургія, енергозбереження, енергоефективність, металургійні підприємства, модель, прогнозування, часовий ряд, інформаційна технологія, штучний інтелект, математична статистика, рекурентний аналіз, екологічні та економічні ризики.

ABSTRACT

Yuskiv O.I. Methods, models and information technology of analysis and improvement of energy efficiency of a metallurgical enterprise. – Qualifying scientific work with manuscript rights.

Dissertation for the Doctor of Philosophy degree in specialty 124 - «System Analysis» - National University «Zaporizhia Polytechnic», Zaporizhzhia, 2025.

The dissertation research is devoted to the development of models and methods that will provide a solution to the scientific and practical problem of managing energy saving processes at an electrometallurgical enterprise, taking into account the dynamics of production processes, strategic goals and risks, which will allow to increase the competitiveness of the enterprise.

Solving this problem is associated with resolving the contradiction between the need to implement energy saving programs at metallurgical enterprises and the imperfection of scientifically based means of achieving this goal in the form of models and methods for managing energy saving processes, which do not fully take into account all information flows of the dynamics of production processes.

The object of the study is the process of energy saving at metallurgical enterprises.

The subject of the research is methods, models and information technology for analyzing energy savings at metallurgical enterprises.

The purpose of the research is to develop models, methods and information technology for analyzing energy conservation at metallurgical enterprises, which will provide a solution to the scientific and practical problem of managing energy conservation processes, taking into account the dynamics of energy consumption, economic and environmental risks.

The dissertation consists of an introduction, four chapters, conclusions, a list of used sources and appendices.

The introduction substantiates the relevance of the topic of the dissertation research, provides the goal, object and subject of the research. The introduction also describes the connection of the work with scientific programs, plans, topics; research

methods are presented and the practical significance of the obtained research results is reflected; lists of published works on the topic of the dissertation and conferences at which the main results of the dissertation were tested were presented.

The first section, «Formation of the concept of research into the problem of energy saving at metallurgical enterprises», analyzes the current state of the metallurgical complex in Ukraine and investigates the problems of energy saving based on a systemic approach. A concept of research into the problem of energy saving at a metallurgical enterprise is also formed.

In the second section, «Methodology for analyzing energy consumption processes at metallurgical enterprises», an analysis of the set of factors that influence energy conservation at a metallurgical enterprise is carried out - environmental risks, analysis of economic costs, and the impact of meteorological factors on energy consumption at metallurgical enterprises.

In the second chapter «Methodology for the analysis of energy consumption processes at enterprises of the metallurgical industry» an analysis of a set of factors affecting energy saving of a metallurgical enterprise is carried out - environmental risks, analysis of economic costs and the influence of weather factors on energy consumption at metallurgical enterprises. The methods of energy inspection at metallurgical enterprises are described to find ways to increase energy saving. The method of energy inspection at a metallurgical enterprise is proposed using the example of conducting an express audit.

The third section, «Modeling energy saving measures at a metallurgical enterprise», addresses the current problem of selecting optimal models for solving the problem of energy saving at a metallurgical enterprise. A method for forecasting daily energy consumption at metallurgical enterprises using neural networks has been proposed, which provides increased forecasting accuracy and, as a result, is a means of energy saving. Econometric models for assessing the impact of meteorological factors (temperature, illumination) on the energy consumption process have been proposed and investigated. The method of recurrent analysis was applied to the process of energy consumption at metallurgical enterprises to explain its nonlinear dynamics. Energy consumption was analyzed using recurrent diagrams in the presence of noise. In the

process of research, quantitative indicators of the analysis of recurrent diagrams were calculated using software, with the help of which regularities were identified and information about the properties of the studied system was obtained.

In the fourth section, «Risk monitoring system as an information technology for analyzing and improving the energy efficiency of a metallurgical enterprise» – based on the methods and models considered in the previous sections, an information technology was developed that combines all previous results based on the formed concept into a single monitoring system, and experimental studies of the developed day-ahead forecasting methods were performed, an analysis of the actual and forecasted value of energy consumption in summer and winter was carried out, calculations of deviations of the forecasted value from the normalized indicator were made, and the economic effect of the forecasted energy consumption was calculated.

To achieve the goal, it was necessary to complete the following tasks.

1. Develop a concept for increasing energy conservation at a metallurgical enterprise, emphasizing the use of information technologies (section 1.3).

2. To justify the need for an energy audit to find ways to save energy and identify areas of efficient energy consumption (section 2.2)
3. To build models for predicting electricity consumption for a metallurgical enterprise based on neural networks in order to increase the accuracy of forecasting (section 3.1).

4. To investigate the influence of meteorological factors (temperature, illumination) on the processes of energy consumption of metallurgical enterprises by building econometric models (section 2.2).

5. To investigate the complexity of the dynamics of energy consumption of metallurgical enterprises by building recurrent diagrams (section 3.2, 3.3).

6. Improve the information technology for monitoring environmental and economic risks of metallurgical enterprises (section 4)

Scientific novelty of the work.

1. For the first time, a concept for increasing energy saving at a metallurgical enterprise has been developed based on information technology for managing energy

saving processes, which is based on the analysis of energy consumption dynamics, economic and environmental risks.

2. The technology of express energy audit based on hourly energy consumption data has been further developed, which takes into account day-night price zones at a metallurgical enterprise and makes it possible to reduce energy consumption during the day.

3. The method of reducing the overall error in forecasting electricity consumption for a metallurgical enterprise has been further developed through the use of artificial intelligence in the form of neural network models, which makes it possible to reduce the discrepancy between forecasted and actual energy consumption.

4. The assessment of the impact of meteorological factors on the energy consumption processes of metallurgical enterprises has been further developed in order to take into account climate change through the use of multifactor econometric modeling.

5. The method of analyzing the nonlinear dynamics of energy consumption of a metallurgical enterprise by constructing recurrent time series diagrams has been further developed, which will allow increasing the predictability of energy consumption under conditions of varying equipment loads.

6. The information technology for monitoring environmental and economic risks of metallurgical enterprises has been improved by developing an infological model of an analytical panel, which enables visualization of deviations from regulatory indicators and appropriate prompt response.

Practical significance of the results obtained. An analytical panel has been developed to monitor and predict the risks of energy consumption overspending, since increasing energy consumption leads to increased environmental risks for a metallurgical enterprise. The analytical panel automates work with data:

- a) electricity consumption is monitored throughout the day;
- b) absolute electricity consumption per day is analyzed;
- c) absolute electricity consumption is forecasted.

The scientific provisions, conclusions and recommendations presented in the dissertation were used in the preparation of the disciplines «Intelligent decision support

systems», «Time series analysis», «System analysis of socio-economic processes» and NDR at the Department of System Analysis and Computational Mathematics of the National University «Zaporizhia Polytechnic» (implementation act dated 12.20.2022). The results of the dissertation work were tested and implemented in the practical activities of Dnipropetsstal Electrometallurgical Plant PrJSC. And M. Kuzmin (implementation act dated 05/22/2024).

Keywords: energy consumption, modeling. metallurgy, energy saving, energy efficiency, metallurgical enterprises, model, forecasting, time series, information technology, artificial intelligence, mathematical statistics, recurrent analysis, environmental and economic risks.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Список праць, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Структура інформаційної технології управління портфелями проєктів енергозбереження на металургійних підприємствах / [В.І. Дубровін, О.І. Юськів] // Електротехніка та електроенергетика. – 2019. – № 4. – С. 46-55. DOI: [10.15588/1607-6761-2019-4-4](https://doi.org/10.15588/1607-6761-2019-4-4).

2. Керування процесами енергозбереження на металургійних підприємствах / [В.І. Дубровін, О.І. Юськів] // Вісник Херсонського національного технічного університету . – 2019. – № 2. – С. 61-69. <https://mkmm.org.ua/upload/%D0%92%D1%96%D1%81%D0%BD%D0%B8%D0%BA%20%D0%A5%D0%9D%D0%A2%D0%A3%20%D1%87%D0%B0%D1%81%D1%82%D0%B8%D0%BD%D0%B0%202.pdf>.

3. Управління портфелями проєктів енергозбереження на металургійних підприємствах / [В.І. Дубровін, О.І. Юськів] // Радіоелектроніка та інформатика. – 2019. – № 2(85). – С. 43-46. DOI: [https://doi.org/10.30837/1563-0064.2\(85\).2019.184743](https://doi.org/10.30837/1563-0064.2(85).2019.184743).

4. Енергозбереження та підвищення енергетичної ефективності виробництва на металургійних підприємствах / [О. І. Юськів, В. І. Дубровін] // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2019. – №1. – С. 93–97. DOI: <https://nmt.zp.edu.ua/article/view/179442/179506>.

5. Neural network forecasting of energy consumption of a metallurgical enterprise / [A. Bakurova, O. Yuskiv, D. Shyrokorad, A. Riabenko, E. Tereschenko] // Innovative technologies and scientific solutions for industries. 2021. – Vol. 1 (15) – P. 14 – 22. – фахове видання. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2021.15.014>

6. Рекурентний аналіз енергоспоживання металургійного підприємства. / [А. В. Бакурова, І. О. Дівоча, С. Г. Кійко, О. І. Юськів] // Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості. – 2023. – № 1 (23). – С. 14–24.

<https://itssi-journal.com/index.php/itssi/article/view/363>. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2023.23.014>.

7. А. В. Бакурова, О. І. Юськів. Аналіз залежності енергоспоживання металургійного підприємства від метеофакторів. Information Technology Computer Science Software Engineering and Cyber Security. – 2024. – № 1. DOI: <https://doi.org/10.32782/IT/2024-1-2>.

8. A. V. Bakurova, O. I. Yuskiv. The effect of noise on recurrent diagrams of energy consumption of a metallurgical enterprise. Technology audit and production reserves 4(1(78)):11-16. DOI: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2024.309790>.

Індексовано в SCOPUS

9. Information system for monitoring economic and environmental risks of the metallurgical enterprise / [A. V. Bakurova, E. V. Tereshchenko, O. I. Yuskiv] // XVI International Scientific Conference “Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment”. – 2022. – P. 18 – 23. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2022580134>.

Список праць, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

10. Юськів О.І. Моделювання та прогнозування енергоспоживання металургійного підприємства. Інформаційні технології: теорія і практика: Тези доповідей III-ї Всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених, 2020 р., м. Харків) [Електронний ресурс] / Редкол. : М. В. Новожилова, І.О.Яковлева, Г. Л. Козіна, Г.В. Бакурова, Т.А. Желдак. Електрон. дані. – Харків : ХНУМГ імені О.М.Бекетова, 2020. – 1 електрон. опт. диск (DVD-ROM); 12 см. УДК 681.3.06:330. 322.54.

11. The development of energy consumption forecasting model for a metallurgical enterprise / [A. Bakurova, O. Yuskiv, D. Shyrokograd, A. Riabenko, E. Tereshchenko] // 9th International Conference on Monitoring, Modeling & Management of Emergent Economy (M3E2 2021). – P. 14-22. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2021.15.014>.

12. Юськів О. І. Урахування метеофакторів в моделі прогнозування енергоспоживання металургійного підприємства. Інформаційні технології: теорія і практика: тези доповідей 4-тої Всеукраїнської інтернет-конференція здобувачів вищої освіти і молодих учених (Дніпро-Запоріжжя-Харків), 17-19 березня 2021 р. – С. 123-126. <https://ir.nmu.org.ua/handle/123456789/159470>.

13. O. Yuskiv. Accounting seasonal temperature variations in forecasting energy consumption of a metallurgical enterprise. Second international conference «MATLAB and computer calculations in education, science and engineering», April 24 – 28, 2021. – P. 67 – 71.

14. Юськів О.І. Система енергоаудиту при реалізації проєктів енергозбереження на металургійному підприємстві / [О.І. Юськів, А.В. Бакурова] // Інформаційні технології: теорія і практика: V Всеукр. Інтернет-конф. здобувачів вищої освіти і молодих учених, 17-18 березня 2022 р.: тези доповідей. – Запоріжжя, 2022. – С. 119-122.

15. Бакурова А.В. Рекурентний аналіз енергоспоживання металургійного підприємства / [А.В. Бакурова, І.О. Дівоча, С.Г. Кійко, О.І. Юськів] // Тиждень науки 2022: щорічна наук.-практ. конф. викладачів, науковців, молодих учених, аспірантів та здобувачів вищої освіти НУ «Запорізька політехніка», 18-22 квітня 2022 р.: тези доповідей. – Запоріжжя, 2022. – С. 884-886. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2023.23.014>.

ЗМІСТ

Анотація.....	2
Abstract.....	7
Список опублікованих праць за темою дисертації.....	12
Зміст.....	15
Перелік умовних скорочень.....	17
Вступ.....	18
1 Формування концепції дослідження проблеми енергозбереження на металургійних підприємствах	27
1.1 Аналіз політики енергозбереження в металургійній промисловості України.....	27
1.2 Сучасний стан металургійного комплексу в Україні.....	34
1.3 Загальна концепція дослідження проблеми енергозбереження металургійного підприємства	40
1.4 Висновки за розділом 1.....	50
2 Методологія аналізу процесів енергоспоживання на підприємствах металургійної промисловості	51
2.1 Методи енергетичного обстеження на металургійних підприємствах: проведення енергетичного аудиту	51
2.2 Системний аналіз сукупності факторів ризику, що впливають на енергозбереження металургійного підприємства.....	55
2.2.1 Аналіз екологічних ризиків.....	57
2.2.2 Аналіз економічних витрат на енергоспоживання	60
2.2.3 Вплив метеофакторів на енергоспоживання металургійних підприємств.....	62
2.3 Висновки за розділом 2.....	70
3 Моделювання заходів енергозбереження на металургійному підприємстві.....	73

3.1 Моделі прогнозування енергоспоживання на основі нейромереж.....	73
3.1.1 Класифікація методів прогнозування	73
3.1.2 Методи з використанням нейромереж	80
3.1.3 Дослідження добового прогнозування енергоспоживання.....	85
3.2 Метод рекурентного аналізу енергоспоживання на металургійних підприємствах.....	96
3.2.1 Побудова рекурентних діаграм часових рядів енергоспоживання.....	96
3.2.2 Кількісні оцінки рекурентних діаграм.....	100
3.2.3 Застосування рекурентних діаграм для аналізу процесів енергоспоживання.....	103
3.3 Аналіз впливу випадкового шуму на рекурентні діаграми.....	107
3.4 Висновки за розділом 3.....	116
4 Система моніторингу ризиків як інформаційна технологія аналізу енергозбереження металургійного підприємства.....	117
4.1. Інфологічна модель системи моніторингу для ідентифікації та управління еколого-економічними ризиками металургійного підприємства.....	117
4.2. Експериментальне дослідження ризиків на металургійному підприємстві за допомогою інформаційної технології	129
4.3 Висновки за розділом 4	132
Висновки.....	135
Список використаних джерел.....	137
Додаток А.....	149
Додаток Б.....	152
Додаток В.....	154

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

- ВЕР – вторинні економічні ресурси
- ВВП – валовий внутрішній продукт
- ГДВ – гранично допустимий викид
- ДСП – дугові сталеплавильні печі
- ЗРС – залізородна сировина
- МК – металургійний комплекс
- ПЕР – паливно-енергетичні ресурси
- ПрАТ – приватне акціонерне товариство
- ТЕБ – техногенно-екологічна безпека
- ТЕЦ – теплоелектроцентраль
- ТЕС – теплова електростанція
- LSTM – long short-term memory

ВСТУП

На сучасному етапі розвитку промисловості, в умовах існуючих техногенних навантажень на навколишнє середовище, важливим є гармонійний розвиток економіки, енергетики та екології. Для цього необхідно впроваджувати заходи, спрямовані на зменшення витрат і економію паливно-енергетичних ресурсів, а також використовувати нові технології, засновані на альтернативних і відновлювальних джерелах енергії, і знижувати викиди шкідливих речовин у навколишнє середовище. У зв'язку з великим обсягом імпортованих енергоносіїв, вирішення цих завдань має вирішальне значення для забезпечення енергетичної безпеки нашої країни.

Обґрунтування вибору теми дослідження. На розвиток підприємств нашої країни впливають значні витрати на енергоресурси, які в середньому становлять 8-12% [1]-[2] на промислових підприємствах. Висока енергоємність металургійних виробництв, в умовах постійного зростання цін на паливно-енергетичні ресурси (ПЕР), ставить на перший план проблему енерго- та ресурсозбереження. Чорна металургія є однією з найбільш енергоємних галузей в Україні. Покращення ефективності використання природних енергетичних ресурсів (ПЕР) на підприємствах чорної металургії в сучасних умовах є одним із ключових аспектів їх виживання. Частка витрат на ПЕР у загальних витратах заводів на виробництво продукції перевищує 30% [3].

Останнім часом в Україні все більше відчувається дефіцит енергоресурсів. Вагомою причиною цього є військові дії. Приблизно 60% всіх паливно-енергетичних ресурсів України використовуються в промислових цілях. Найбільш енергоємними галузями промисловості є паливно-енергетичний комплекс, кольорова та чорна металургія, хімічна та нафтохімічна промисловість, машинобудування та металообробка.

Далі будемо застосовувати такі терміни та поняття.

Енергетичний баланс – система показників, що характеризують ресурси, виробництво і використання всіх видів палива й енергії. Енергоспоживання

металургійного підприємства є складною системою, що має багатовимірний простір параметрів та обмежень енергобалансу металургійного підприємства.

Енергозбереження – це діяльність (організаційна, наукова, практична, інформаційна), яка направлена на раціональне використання та економне витрачання первинної та перетвореної енергії, природних енергетичних ресурсів в національному господарстві, що реалізується з використанням технічних, інформаційних, економічних і правових методів.

Механізм енергозбереження реалізація інформаційних, законодавчих, правових, економічних і організаційних заходів, які направлені на ефективне використання енергетичних ресурсів і покращення стану навколишнього середовища [4].

Енергоспоживання – це процес споживання електроенергії під час функціонування обладнання, виробництва продукції, здійснення робіт тощо. На виробництві енергоспоживання відбувається під час процесів експлуатації, виготовлення, ремонту чи утилізації виробів [2].

Норма енергоспоживання – розрахована й обґрунтована кількість енергоресурсів, яка необхідна та достатня для здійснення технологічного процесу при вказаних параметрах виробництва та оточуючого середовища [4].

Енергоспоживання металургійного підприємства є складною системою, що має багатовимірний простір параметрів та характерних обмежень, що притаманні енергобалансу металургійного підприємства. Ефективне управління енергоспоживанням дозволяє знизити витрати на енергоносії, що може суттєво підвищити загальну ефективність підприємства.

Економічний ефект – це показник результативності економічної діяльності, реалізації програм та заходів, який визначається співвідношенням отриманого економічного результату до витрат ресурсів, що призвели до цього результату [4].

Енергоефективність – це характеристика обладнання, технологій та виробництв, що відображає ефективність використання енергії для отримання

кінцевого продукту. Вона оцінюється як кількісними показниками (кількість енергії на одиницю кінцевого продукту), так і якісними (низька або висока) [2].

Енергоефективність – ефективне використання енергетичних запасів.

Це застосування меншої кількості енергії для підтримання того ж рівня енергетичного забезпечення будівель або технологічних процесів на виробництві [3]. На відміну від енергозбереження (збереження енергії), головним чином спрямованого на зменшення енергоспоживання, енергоефективність (корисність енергоспоживання) – доцільне (ефективне) витрачання енергії.

Енергоємність продукції – це показник, який встановлює рівень і плідність застосування ресурсів (електроенергії або палива) у виробництві. Енергоємність продукції є одним з найважливіших показників виробництва, визначає його ефективність і безпосередньо впливає на собівартість продукції [4].

Паливно-енергетичний баланс – це набір показників, що відображає кількісну рівновагу між отриманням і споживанням енергії, а також характеризує структуру виробництва на підприємстві [3].

В даній роботі приділено увагу використанню інформаційних технологій та екологічній дієвості металургійного підприємства в системі заходів енергозбереження.

Міжнародний договір, який присвячений запобіганню змін клімату і сприянню сталому розвитку для всіх країн, незалежно від їхнього економічного розвитку, є Паризька угода (була підписана 12 грудня 2015 року в Парижі на 21-й Конференції сторін Рамкової конвенції ООН зі зміни клімату (COP21)) [5]. Основною метою угоди є обмеження глобального потепління до значення не більше ніж 1,5°C порівняно з доіндустріальним рівнем. Це досягається шляхом значного зниження викидів парникових газів, покращення енергетичної ефективності, а також переходу на відновлювальні джерела енергії. Угода створює глобальні стимули для металургійної галузі щодо переходу на більш екологічні методи виробництва. Зокрема, це стосується зменшення викидів CO₂, що є основною проблемою в металургії через традиційні технології, такі як доменний процес. Підприємства повинні інвестувати в нові технології, зокрема водневі та

електричні печі, щоб задовольнити нові вимоги щодо зниження викидів. Одним із шляхів, якими підприємства можуть демонструвати свою екологічну відповідальність, є отримання сертифікацій за стандартами, що підтверджують впровадження енергоефективних та екологічно чистих технологій. Такі сертифікації, наприклад, ISO 14001 або EMAS, підвищують конкурентоспроможність на міжнародному ринку, оскільки споживачі та партнери надають перевагу компаніям, які відповідають високим екологічним стандартам.

Резерви енергозбереження й підвищення рівня енергоефективності виробничих процесів підприємств досліджуються в працях багатьох учених: В. А. Толбатова [6], С. Г. Кійка [7], М. М. Мазова [8], Г. В. Никифорової [9], С. В. Цюцюри [10], К. Bunse [11], Н. Wang [12], J.-C. Brunke [13], M. Vodicka [14], Y. Ren [15], Belt S. K. [16] та ін. Незважаючи на велику кількість публікацій в області теорії організації енергозбереження в металургійному виробництві, сьогодні немає комплексних інформаційних технологій для реалізації на них енергозберігаючих проєктів.

В дисертаційній роботі запропоновані такі шляхи підвищення енергозбереження на металургійному підприємстві, що ґрунтуються на інформаційних технологіях, зокрема:

- підвищення точності прогнозування електроспоживання (моделі прогнозування електроспоживання на основі нейромереж, рекурентний аналіз часових рядів енергоспоживання);
- врахування кліматичних, сезонних змін і цінових зон електроспоживання (економетричні моделі оцінки впливу метеофакторів (температури, освітленості)).

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

Дисертаційна робота відповідає «Концепції розвитку штучного інтелекту в Україні» (схвалена Розпорядженням Кабінету Міністрів України від 2.12.2020 № 1556-р), Розпорядженню Кабінету Міністрів України «Про затвердження плану заходів з реалізації Концепції розвитку штучного інтелекту в Україні на 2021-2024 роки» від 12.05.2021 р. № 438-р, Постанові Верховної Ради України «Про

затвердження завдань Національної програми інформатизації на 2022-2024 роки» від 8.07.2022 № 2360-IX, Постанові Кабінету Міністрів України «Про затвердження Національної економічної стратегії на період до 2030 року» від 3.03.2021 р. № 179. Закону України від 21.10.2021 № 1818-IX Про енергетичну ефективність.

Дослідження виконувалися автором на основі даних про енергоспоживання ПрАТ «ДНІПРОСПЕЦСТАЛЬ» згідно планів виконання програм енергозбереження на цьому підприємстві. Робота виконана відповідно до планів науково-дослідних робіт (НДР) Національного університету «Запорізька політехніка» у межах тем: «Математичне моделювання соціально-економічних процесів та систем» (номер реєстрації – 05038), «Розвиток методів дослідження складних соціально-економічних систем на основі інтелектуальних технологій» (номер державної реєстрації – 0121U113264). У зазначених НДР здобувач брав участь як виконавець, удосконалив та розробив методи моніторингу та прогнозування ризиків перевитрат енергоспоживання на металургійному підприємстві.

Об’єкт дослідження – процес енергозбереження на металургійних підприємствах.

Предметом дослідження є методи, моделі та інформаційна технологія аналізу енергозбереження на металургійних підприємствах.

Мета досліджень полягає у розробці моделей, методів та інформаційної технології аналізу енергозбереження на металургійних підприємствах, які забезпечать вирішення науково-практичної проблеми управління процесами енергозбереження з урахуванням динаміки енергоспоживання, економічних та екологічних ризиків.

Розробка методів та моделей управління процесами енергозбереження на металургійному підприємстві в цій дисертаційній роботі вимагає вирішення таких задач:

– розробити концепцію підвищення енергозбереження на металургійному підприємстві, що акцентує використання інформаційних технологій (розділ 1.3).

– обґрунтувати необхідність енергоаудиту для пошуку шляхів енергозбереження та визначення напрямів ефективного енергоспоживання (розділ 2.2);

– побудувати моделі прогнозування електроспоживання для металургійного підприємства на основі нейронних мереж з метою підвищення точності прогнозування (розділ 3.1);

– дослідити вплив метеофакторів (температури, освітленості) на процеси енергоспоживання металургійних підприємств, за допомогою побудови економетричних моделей (розділ 2.2);

– дослідити складність динаміки енергоспоживання металургійних підприємств шляхом побудови рекурентних діаграм (розділ 3.2, 3.3);

– удосконалити інформаційну технологію моніторингу еколого-економічних ризиків металургійних підприємств (розділ 4).

Методи дослідження. Для вирішення задач, поставлених у дисертаційній роботі, використано методи:

системний підхід – під час формування концепції для розробки інформаційної технології у вигляді системи моніторингу ризиків при реалізації процесів енергозбереження на металургійних підприємствах;

методи рекурентного аналізу – для аналізу часових рядів енергоспоживання та кількісних показників відповідних рекурентних діаграм, які можна використовувати для оцінки стану системи під час виявлення факторів, що впливають на енергоефективність та процеси енергозбереження;

методи штучного інтелекту – під час побудови нейромережових моделей прогнозування енергоспоживання, які враховують добові об'єми спожитої електроенергії;

методи математичної статистики – для побудови економетричних моделей;

методи оцінювання ризиків – під час відбору й оцінювання реалізованості методів прогнозування енергозбереження на добу вперед.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у розробці моделей, методів та інформаційної технології аналізу енергозбереження на металургійних

підприємствах, які забезпечать вирішення науково-практичної проблеми управління процесами енергозбереження з урахуванням динаміки енергоспоживання, економічних та екологічних ризиків. Основні результати, які визначають наукову новизну дисертаційної роботи:

1. Вперше розроблена концепція підвищення енергозбереження на металургійному підприємстві на основі інформаційної технології управління процесами енергозбереження, яка ґрунтується на аналізі динаміки енергоспоживання, економічних та екологічних ризиків.

2. Набула подальшого розвитку технологія експрес-енергоаудиту на основі даних про погодинне енергоспоживання, що враховує цінові зони день-ніч на металургійному підприємстві та дає можливість скорочувати енергоспоживання у денні часи.

3. Набув подальшого розвитку метод зниження загальної похибки прогнозування електроспоживання для металургійного підприємства за рахунок використання штучного інтелекту у вигляді моделей нейронних мереж, що дає можливість скоротити розбіжність між прогнозованим та фактичним енергоспоживанням.

4. Набуло подальшого розвитку оцінювання впливу метеофакторів на процеси енергоспоживання металургійних підприємств з метою врахування кліматичних змін за рахунок застосування багатофакторного економетричного моделювання.

5. Отримав подальшого розвитку метод аналізу нелінійної динаміки енергоспоживання металургійного підприємства за рахунок побудови рекурентних діаграм часових рядів, що дасть змогу підвищити передбачуваність енергоспоживання в умовах різного навантаження обладнання.

6. Вдосконалено інформаційну технологію моніторингу еколого-економічних ризиків металургійних підприємств за рахунок розробки інфологічної моделі аналітичної панелі, що уможливорює візуалізацію відхилень від нормативних показників та відповідне оперативне реагування.

Практичне значення отриманих результатів

Проведений аналіз енергоспоживання та енергоаудит металургійного підприємства за сезонами зима-літо показав, що літній період характеризується більшою передбачуваністю, а також значно вищим показником затримки, який характеризує середній час, коли система може провести майже в незмінному стані. Застосування методології рекурентного аналізу до часових рядів споживання електроенергії в перспективі може призвести до позитивного економічного ефекту за рахунок підвищення енергоефективності металургійного підприємства. Моніторинг еколого-економічних ризиків дозволить отримати більш точну вихідну інформацію для прийняття управлінських рішень щодо їх впровадження в умовах різного навантаження обладнання у зв'язку з різною інтенсивністю виробництва, що зменшить негативний вплив технологій металургійних підприємств на навколишнє природне середовище.

Розроблені моделі, методи та інформаційна технологія дозволять визначити оптимальну траєкторію енергоспоживання в багатовимірному просторі параметрів та обмежень енергобалансу металургійного підприємства. За допомогою розробленої моделі можуть бути визначені сценарії розвитку, які є можливими з точки зору вибору напрямку вектора стратегічного прогнозування.

Наукові положення, висновки і рекомендації, викладені в дисертаційній роботі, використано при підготовці дисциплін «Інтелектуальні системи підтримки прийняття рішень», «Аналіз часових рядів», «Системний аналіз соціально-економічних процесів» та НДР кафедри системного аналізу та обчислювальних методів Національного університету «Запорізька політехніка» (акт впровадження від 27.02.2025).

Результати дисертаційної роботи апробовано та впроваджено у практичну діяльність ПрАТ «ДНПРОСПЕЦСТАЛЬ» (акт впровадження від 22.05.2024).

Особистий внесок здобувача. Всі основні наукові результати дисертаційної роботи отримано автором особисто. Роботу з експериментального дослідження програмних модулів, що реалізують запропоновані у роботі методи управління проектами енергозбереження, проведено разом із співавторами,

прізвища яких наведено у бібліографічному списку. У роботах, написаних зі співавторами, здобувачеві належать такі результати: [81, 99] – прогноз енергоспоживання на добу вперед для металургійного підприємства; [54, 63, 86] – урахування сезонних коливань температури та шуму при прогнозуванні енергоспоживання металургійного підприємства; [99] – реалізація енергоаудиту енергозбереження на металургійному підприємстві; [85, 97] – рекурентний аналіз енергоспоживання металургійного підприємства; [96] – інформаційна система моніторингу економічних та екологічних ризиків металургійного підприємства.

Апробація матеріалів дисертації. Основні результати дисертаційної роботи доповідалися й обговорювалися на міжнародних конференціях і форумах: III-я Всеукраїнська науково-практична інтернет-конференція здобувачів вищої освіти і молодих учених, 2020 р., м. Харків; 9th International Conference on Monitoring, Modeling & Management of Emergent Economy (M3E2 2021); 4-та Всеукраїнська інтернет-конференція здобувачів вищої освіти і молодих учених (Дніпро-Запоріжжя-Харків), 17-19 березня 2021 р.; Second international conference «Matlab and computer calculations in education, science and engineering», April 24 – 28, 2021; V Всеукр. Інтернет-конф. здобувачів вищої освіти і молодих учених, 17-18 березня 2022 р.; тиждень науки 2022: щорічна наук.-практ. конф. викладачів, науковців, молодих учених, аспірантів та здобувачів вищої освіти НУ «Запорізька політехніка», 18-22 квітня 2022 р.; XVI International Scientific Conference «Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment».

Матеріали дисертації повною мірою викладені у 15 публікаціях, з яких 9 наукових публікацій розкривають основний зміст дисертації, зокрема опубліковано 8 статей у наукових виданнях, включених до Переліку наукових фахових видань України з технічних наук, 1 публікація включена у міжнародну наукометричну базу Scopus.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних джерел, додатків. Загальний обсяг роботи складає 156 сторінок тексту, що містять 2 анотації на 10 сторінках, 37 рисунків, 12 таблиць, список використаних джерел з 99 найменувань на 12 сторінках.

1 ФОРМУВАННЯ КОНЦЕПЦІЇ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОБЛЕМИ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ НА МЕТАЛУРГІЙНИХ ПІДПРИЄМСТВАХ

Перший розділ присвячений аналізу стану металургійного комплексу та дослідженню загальної проблеми управління процесами енергозбереження на металургійних підприємствах. У першому розділі розглянуто основні підходи та сучасні рішення в напрямку енергозбереження на металургійних підприємствах з метою визначення найбільш перспективних напрямків досліджень. Сформована загальна концепція дослідження проблеми підвищення енергозбереження металургійного підприємства.

1.1 Аналіз політики енергозбереження в металургійній промисловості України

Розвиток світової економіки тісно пов'язаний із постійним зростанням виробництва. Високий рівень енергоємності виробництва є ключовою проблемою, яка суттєво обмежує конкурентоспроможність української економіки. За різними оцінками, у 2019 році споживання енергетичних ресурсів на одиницю ВВП в Україні становило 15% і перевищує аналогічні показники розвинених країн у два-три рази [18, 19].

Україна є енергодефіцитною країною, яка забезпечує свої потреби в паливно-енергетичних ресурсах власними джерелами менш ніж наполовину. У зв'язку з цим важливим стратегічним напрямом державної політики економічного і соціального розвитку є енергозбереження, яке реалізується шляхом розвитку нових технологій енергозбереження, маловідходності та безвідходності, управління ефективними системами і засобами запобігання енерговитратам і забрудненню навколишнього середовища, впровадження інтегрованого енергетичного та економічного менеджменту [18].

Питання ефективного управління енергоспоживанням на металургійних підприємствах в сучасних умовах розвитку економіки набуває

особливого значення. Це пов'язано з тим, що в умовах обмеженості фінансових, енергетичних та інших ресурсів неправильний вибір стратегії і тактики діяльності підприємств може мати серйозні наслідки і загрожувати їх виживанню. Стратегія управління енергозбереженням металургійних підприємств вказує на основні пріоритети його розвитку, можливості та ризики, пов'язані із зовнішнім середовищем та внутрішніми організаційними процесами [19], [20].

В умовах сучасного ринку управління енергоефективністю металургійних підприємств України є вкрай важливим з низки причин. Серед основних факторів можна виділити невизначеність майбутнього, ризики, необхідність оптимізації екологічних наслідків, а також потребу у фінансових ресурсах. [21-24].

Споживання енергетичних ресурсів у різних сферах діяльності визначається комплексом виробничих і технологічних чинників. Тому для розробки та прийняття технічно обґрунтованих і економічно доцільних рішень важливо встановити закономірності формування енерговитрат у вигляді математичних моделей енергоспоживання, які враховують рівень і динаміку споживання енергії.

Оскільки металургійні підприємства є значними споживачами електричної та теплової енергії, для вирішення проблеми енергозбереження в рамках комплексних програм і проєктів необхідно узгодити основні напрямки енергозбереження з програмами розвитку ключових виробництв [23], [24]. Актуальність цих питань зумовлена потребою покращення економічної стабільності підприємств, підвищення конкурентоспроможності продукції та зменшення залежності від постачальників енергоресурсів. Для металургійних заводів енергозбереження є одним із ключових напрямків для зниження виробничих витрат і підвищення конкурентоспроможності. В умовах зростаючої конкуренції в металургійній сфері зниження цін на енергоємну металопродукцію шляхом оптимізації споживання енергетичних ресурсів і зменшення енергетичних витрат є одним із найважливіших чинників, що впливають на фінансово-економічний стан підприємств металургійної промисловості та їх сталий розвиток на світовому ринку [25].

До особливостей енергоспоживання металургійним підприємством відносяться:

- велика кількість електроустаткування, що бере участь в здійсненні технологічного процесу в кожному підрозділі;
- велика різноманітність типів і потужностей приймачів електроенергії;
- відносно слабкі зв'язки взаємного впливу приймачів електроенергії при здійсненні технологічного процесу;
- велика кількість електроустаткування, що бере участь в забезпеченні технологічного процесу в кожному підрозділі і створює умовно-постійне навантаження, також залежить від інтенсивності технологічного процесу;
- фактори, що випадковим чином впливають на режими і обсяг енергоспоживання;
- переважаючий, в порівнянні з іншими факторами, вплив обсягу виробництва на обсяг споживання електроенергії;
- великий час використання максимуму електричної потужності;
- можливі зміни в режимах роботи, конфігурації обладнання, асортименті продукції або інших систематичних факторів у секторі;
- висока енергоємність кінцевого продукту.

Орієнтовна структура енергоспоживання за всіма видами палива на інтегрованих металургійних підприємствах з повним циклом виробництва. В загальному паливно-енергетичному балансі окремих ресурсів становить: кокс – 44%, природний газ – 25%, електроенергія – 4%, тепла енергія – 4%, мазут – 1% від загального споживання в галузі. Найбільше енергії споживають доменне та прокатне виробництва, оскільки саме в цих процесах використовується найбільша кількість пічного палива.

На підприємствах, які виплавляють сталь в дугових сталеплавильних печах (ДСП) (яким є «ДНПРОСПЕЦСТАЛЬ»), в тому числі з неповним циклом виробництва, електроенергія є основним енергетичним ресурсом, а також використовується енергія природного палива, переважно природного газу, для газокисневих пальників для підігріву металобрухту перед завантаженням в піч,

також безпосередньо в самій печі для прискорення процесу плавки [26, 27]. Застосування в основному виробництві електроенергії та природного палива визначає особливості структури паливно-енергетичного балансу на металургійних підприємствах.

Металургійне виробництво, як правило, має наступну технологічну структуру [23, 24]:

- виробництво чавуну: коксохімічне виробництво; агломераційний цех; доменний цех;
- виробництво сталі: киснево-конвертерний цех; мартенівський цех; електросталеплавильний цех;
- виробництво прокату: обжимний цех; товстолистовий стан; крупносортовий стан; універсальний стан.

Виробництво сталі на підприємстві «ДНІПРОСПЕЦСТАЛЬ» здійснюється у чотирьох основних сталеплавильних цехах. У цеху порошкової металургії розташована індукційна піч. В основному сталеплавильному цеху сталь виплавляється у відкритих електродугових печах, після чого проходить продувку в аргоно-кисневому конвертері та додаткову обробку на установці піч-ківш.

Металургійне виробництво підприємства використовує як газоподібне, так і тверде паливо для виробничих та побутових потреб. Природний газ застосовується у виробничому процесі як котельно-пічне паливо, тоді як доменний газ використовується у суміші з природним газом для забезпечення виробничих потреб.

У електроплавильному виробництві основну частку економії енергоресурсів можна отримати шляхом оптимізації роботи дугових печей. Розглядаючи енергобаланс дугової печі слід зазначити, що прибуткова частина визначається отриманою з мережі електроенергією і теплом від екзотермічних реакцій. Частка електроенергії в прибутковій частині балансу становить до 85% при плавлі без застосування кисню і 65-75% з його застосуванням. У видатковій частині балансу близько 40% становлять теплові та електричні витрати і приблизно 60% – корисні витрати. Найбільший вплив на величину теплових втрат великих

дугових печей надає тривалість циклу плавки. Основні елементи, що впливають на електричні втрати – пічний трансформатор і вторинний токопровід.

Найбільш повне вирішення питань, пов'язаних з оптимізацією структури енергетичного господарства промислових об'єктів, дає системний підхід. Розгляд енергоспоживання як складної системи, оптимізація роботи кожного елемента і облік їх впливу на роботу об'єкта в цілому можуть дати суттєвий результат, особливо на об'єктах реконструкції та проєктованих об'єктах.

Найважливішим завданням у плануванні та управлінні електроспоживанням на металургійних підприємствах є нормування та прогнозування споживання електроенергії. Раціональні норми споживання електроенергії дозволяють прогнозувати споживання електроенергії по галузях і підприємствах, здійснювати моніторинг ефективності використання електроенергії в конкретних галузях (підрозділах) і виявляти зони неефективного енергоспоживання [30]. Питання нормування електроспоживання розглянуті в роботах Момота А. С. [24], К. Bunse [28], Кулика І. М. [31], Борисенко О. Є. [32].

У роботі [29] для прогнозування енергоспоживання підприємств металургії запропоновано використовувати нейронні мережі та глибоке навчання, а саме модель LSTM.

Слід зазначити світову тенденцію переходу до створення електрометалургійних заводів малої потужності зі стратегією мінімізації витрат, тобто переплавки металобрухту в ДСП і розливу на сортових машинах безперервного розливання заготовок [34].

У загальному випадку у підрозділах підприємства можуть бути споживачі електроенергії, споживачі-регулятори (це споживачі електричної енергії, режими роботи яких передбачають можливість обмеження електроспоживання в години максимуму і збільшення навантаження в години мінімуму), постачальники (енергоресурсів, що виробляються на підприємстві), підрозділи, що перетворюють енергію. На рівні підрозділів, використовуючи інформацію про нормовані величини ресурсів та графік енергоспоживання, вирішуються локальні завдання

управління електроспоживанням за допомогою автоматизованої системи диспетчерського управління.

Одним з основних елементів системи управління електроспоживанням технологічного процесу є низка автоматизованих систем комерційного та технічного обліку, що здійснюють збір і обробку інформації про поточне споживання енергетичних ресурсів.

На основі цих даних формується єдина інформаційна база даних про ефективність використання електроенергії за відповідний період. З використанням отриманої бази даних в підсистемі планування і контролю здійснюється поточний контроль ефективності використання енергетичних ресурсів підрозділами.

Ці заходи можуть бути спрямовані як на безпосереднє скорочення споживання первинних енергоресурсів у виробництві шляхом впровадження сучасних технологій та обладнання, так і на забезпечення відповідності встановленим нормам і стандартам енергоспоживання, а також на обґрунтування раціонального використання енергоносіїв. Крім того, вони можуть включати опосередковане **зниження питомих енерговитрат** завдяки ефективнішому використанню вторинних енергоресурсів за підтримки держави.

Тому виникає необхідність розробки нової **інформаційної технології управління економічними ризиками процесів енергозбереження на металургійних підприємствах з урахуванням стратегічних цілей**. Така **інформаційна технологія** дозволить приймати рішення в умовах багатокритеріального оцінювання з урахуванням різноманітності завдань, що вирішуються на металургійних підприємствах, планування та реалізації **комплексів заходів** у різних часових аспектах, взаємозв'язків і координації, ризиків, механізмів фінансування тощо. На виході така інформаційна технологія повинна допомогти прийняти оптимальне рішення щодо вибору та реалізації **комплексів заходів з енергозбереження**.

На сьогоднішній день реалізацією політики енергозбереження та впровадження відновлюваної енергетики забезпечують такі стратегії і механізми [35-38]:

1. Європейська Комісія запропонувала новий механізм фінансової допомоги Україні від ЄС «Ukraine Facility» для надання послідовної підтримки Україні з 2024 по 2027 рік. З метою реалізації ініціативи ЄС «Ukraine Facility» розпорядженням Кабінету Міністрів України від 18 березня 2024 р. № 244 (Офіційний вісник України, 2024 р., № 32, ст. 2035) схвалено План України.

Стратегія узгоджена із Планом України та доповнює його. План України враховує потребу у створенні складних ланцюгів доданої вартості та переробці сировини в Україні, розвитку металургійної промисловості. Саме тому наголошується на необхідності залучення інвестицій і підтримки розвитку переробної промисловості

2. Місією Енергетичної стратегії України до 2050 року є створення умов для сталого розвитку національної економіки через забезпечення доступу до надійних, стійких і сучасних джерел енергії. До 2050 року енергетичний сектор має бути максимально наближений до кліматичної нейтральності [38].

3. Комплексне державне управління в сфері енергоефективності та енергозбереження в Україні здійснює Державне агентство з енергоефективності та енергозбереження України (Держенергоефективність).

4. Держенергоефективність утворено 9 грудня 2010 року Указом Президента України № 1085/2010 (на основі реорганізації Національного агентства України з питань забезпечення ефективного використання енергетичних ресурсів – НАЕР).

5. Закон України від 21.10.2021 № 1818-IX «Про енергетичну ефективність». Цей закон регулює відносини, що виникають у сфері забезпечення енергетичної ефективності, і має на меті зміцнення енергетичної безпеки, зменшення енергетичної бідності, сприяння сталому економічному розвитку, збереження первинних енергоресурсів та зниження викидів парникових газів.

Законопроект «Про енергоефективність» був прийнятий 2022 року де парламент України прийняв рішення до енергоефективної економіки України. Законопроект розроблений у рамках імплементації Директиви 2012/27/ЄС, який базується на таких засадах [35]:

- визначення державної політики та підтримки сфери енергоефективності;

- визначення управління та розподілу відповідальності органів центральної виконавчої влади у сфері забезпечення енергетичної ефективності;
- при публічних закупівлях енергоспоживчих продуктів (товарів) державними органами, встановлюється вимога орієнтуватись на максимальний клас енергетичної ефективності товарів;
- визначення та досягнення цільового показника щорічного зниження споживання енергії, який має становити щонайменше 0,7% від загального річного обсягу постачання енергії споживачам;
- визначаються вимоги до екодизайну продукції, що пов'язана зі споживанням енергії.;
- визначається поняття та процедура енергетичного аудиту;
- надається обґрунтування кваліфікації енергетичних аудиторів;
- запроваджується національна система енергетичного моніторингу, визначається адміністратор та функції даної системи;
- встановлюються поняття та особливості стимулювання енергоефективності у сфері передачі й розподілу електроенергії, транспортування та розподілу природного газу, а також підвищення ефективності у галузі теплопостачання та охолодження;
- надається обґрунтування щодо залучення енергосервісних компаній.

1.2 Сучасний стан металургійного комплексу в Україні

За останні кілька років вітчизняна промисловість зіткнулася з новими викликами, зокрема пандемією коронавірусу, яка спричинила закриття ринків і скорочення споживання [39]. Однак вирішальним фактором стала війна: у порівнянні з 2013 роком Україна втратила приблизно 80% виробництва сталі, і найбільше падіння відбулося у 2022 році. Статистичні дані щодо середньодобового виробництва сталі у 2000–2004 роках наведені на рис. 1.1.

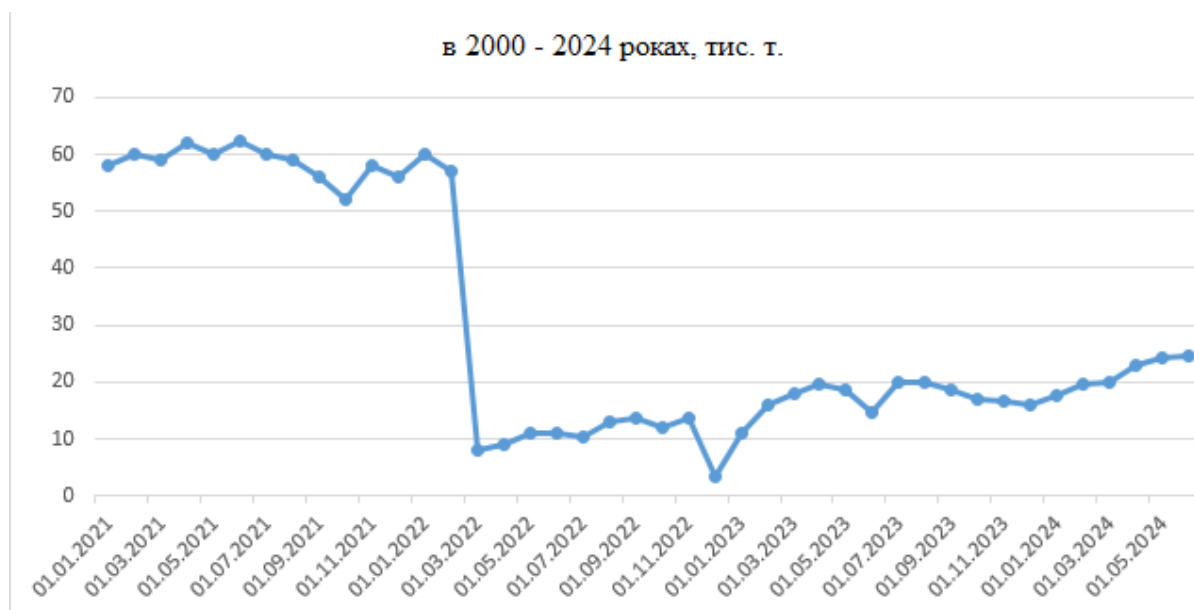


Рисунок 1.1 – Середньодобове виробництво сталі (Джерело: Укрметалургпром)

Наслідки війни:

1) **зупинка та руйнування активів:** після 24 лютого 2022 року найбільші українські металургійні компанії оголосили про зупинку виробництва в Маріуполі, Запоріжжі, Кривому Розі та Дніпрі;

2) **нестача обігових коштів.** Після початку повномасштабного вторгнення росії в Україну призупинення роботи системи адміністрування ПДВ та єдиного реєстру накладних зупинило процедуру відшкодування ПДВ для експортерів. В результаті металургійні та гірничодобувні підприємства відчули 20% нестачу обігових коштів. Тому деякі підприємства звернулися до міжнародних кредитних організацій для фінансування своєї діяльності.

3) **стали логістичні обмеження.** Напади росії на залізничну інфраструктуру та блокада найважливіших морських портів стали одним із найсерйозніших викликів для галузі

4) атаки на об'єкти критичної інфраструктури призвели до знеструмлення енергосистеми України. Як наслідок, домогосподарства та промисловість відчули

брак електроенергії. У листопаді, вдруге з початку війни, українські металургійні підприємства оголосили про вимушену зупинку основних виробничих процесів..

Після стабілізації ситуації ці підприємства відновили роботу в межах виділених квот на споживання електроенергії, застосовуючи максимальні заходи економії та знижуючи навантаження на обладнання.

На початку 2023 року уряд дозволив імпорт електроенергії з ЄС до кінця квітня. Зокрема, гарантуючи «невідключення» для обсягів закупленої електроенергії.

У лютому «Метінвест» почав імпортувати необхідну електроенергію і зміг підняти завантаження «Каметсталі» до 65% після її зупинки в листопаді 2023 року; тільки в лютому 2023 року енергосистема вийшла на бездефіцитне виробництво.

У першому півріччі 2023 року українські видобувні компанії збільшили експорт залізної руди на 10% до 1,67 млн тон порівняно з березнем 2023 року. У вартісному вираженні експорт ЗРС збільшився на 12,2% порівняно з аналогічним періодом минулого року – до 187,74 млн доларів США. Про це свідчать дані Державної митної служби [40], що представлені на рисунку 1.2.

Експортна виручка у квітні 2023 року була на 18% нижчою, ніж у квітні 2022 року. У фізичному вираженні відвантаження залізної руди впало на 51%.

У січні-квітні 2023 року вітчизняні гірничодобувні компанії експортували 5,32 млн тон залізної руди, що на 59% менше, ніж у минулому році. Виручка від експорту залізної руди за чотири місяці впала на 62,5%.

У січні-квітні 2023 року найбільшим споживачем української руди була Словаччина - 27,4%, на другому місці – Чехія (25,8%), на третьому-Польща (24%). До війни в Україні Китай був основним споживачем української залізної руди, але блокада українських портів зробила транспортування сировини до Китаю неконкурентоспроможним [41].

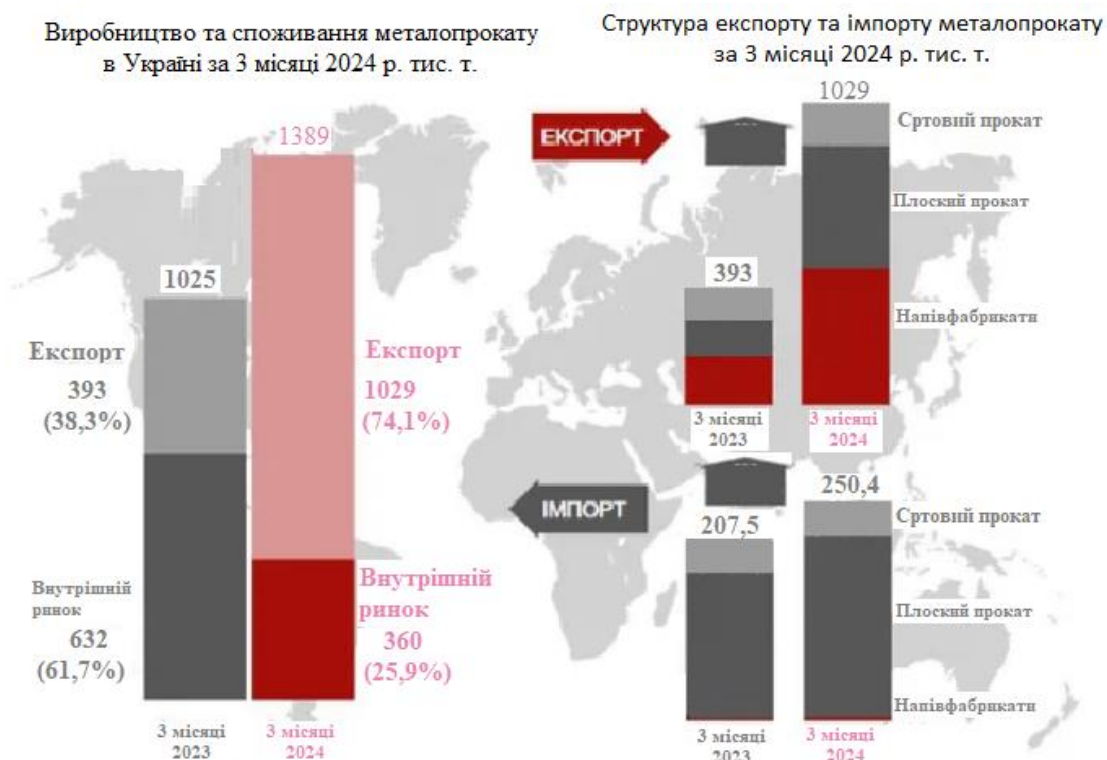


Рисунок 1.2 – Виробництво та експорт металопродукції за 2024 рік
(Джерело: [40])

У 2023 році ситуація в галузі поступово відновлюється, але показники все ще далекі від довоєнного рівня. За даними «Укрметалургпром», показники виробництва за січень-червень 2023 року виглядають наступним чином:

- сталі 2,83 млн. тон (62,3 %);
- прокату 2,38 млн. тон (59,0 %);
- чавуну 2,48 млн. тон (62,5 % щодо до січня – червня 2022 року);

За оцінкою «Всесвітньої асоціації сталі» (Worldsteel), за підсумками п'яти місяців 2023 року Україна посідає 17-те місце у світовому рейтингу виробників чавуну та 25-те – виробників прокату. За цими видами продукції виробництво за 2023 рік впало на 44% [40].

У січні-червні 2023 року Україна експортувала 550 тис. тон напівфабрикатів на суму 299 мільйонів доларів США. Обсяги експорту впали на 62% порівняно з аналогічним періодом минулого року, а виручка – на 67%. Основними імпортерами

напівфабрикатів у цей період були: Польща (35,5% поставок у вартісному вираженні), Болгарія (29,8%) та Італія (7,5%); у 2022 році основними імпортерами були: Болгарія (25,6%), Польща (14%) та Італія (12%).

Експорт напівфабрикатів стабільно зростає з початку 2023року: у лютому він збільшився на 81%, у березні – на 25,5%, а в червні впав на 33% у фізичному вимірі. Падіння в червні експерти пов'язують з вибухом на Каховській ГЕС. Це призвело до тимчасового призупинення виробництва сталі та прокату на «АрселорМіттал Кривий Ріг» та перебоїв на кількох інших підприємствах (рис.1.3, 1.4).

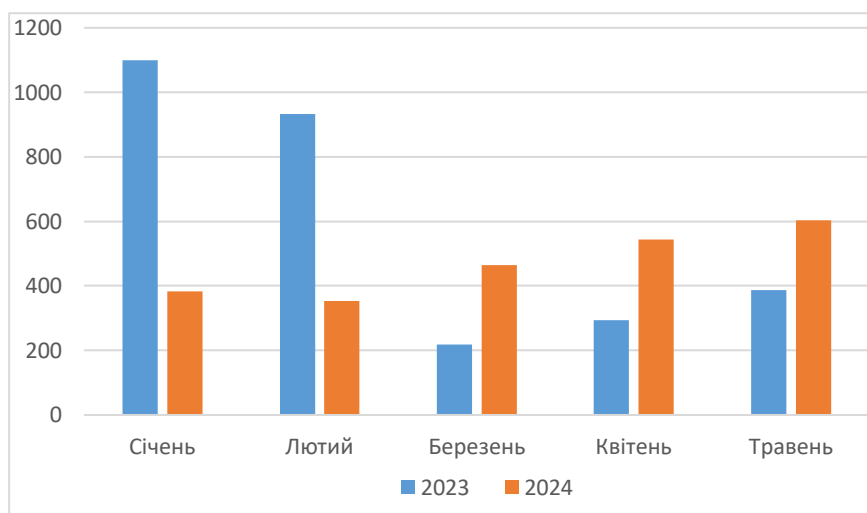


Рисунок 1.3 – Виробництво чавуну в Україні в 2022-2023 роках
(Джерело: [41])

Через блокаду морських портів єдиним способом транспортування українських металів за кордон є залізниця. Однак через великий наплив вантажів Україна не в змозі обробляти і передавати вагони до ЄС швидко і за графіком. Крім того, логістичні витрати зросли щонайменше вдвічі.

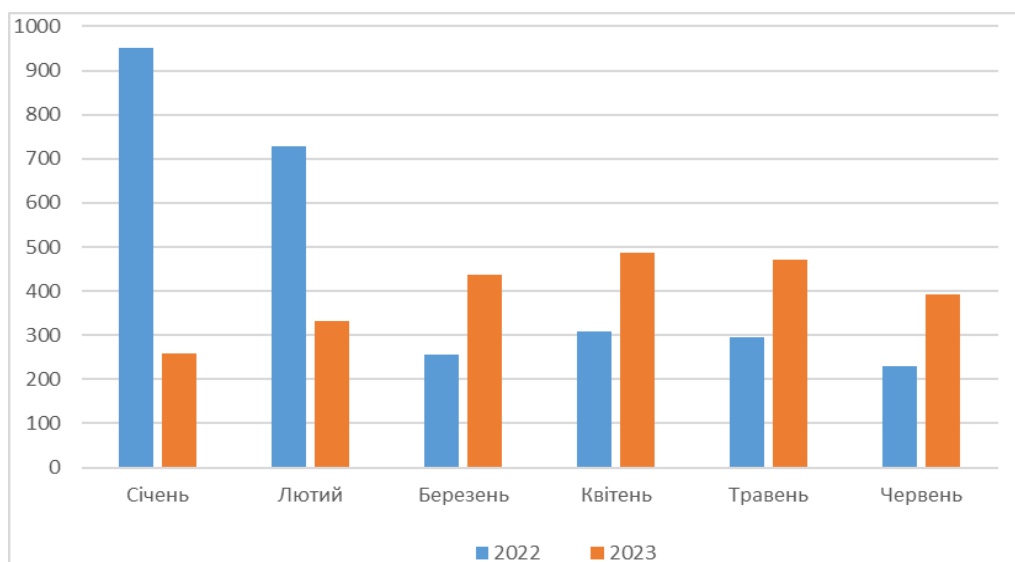


Рисунок 1.4 – Динаміка щомісячного виробництва прокату в Україні в I півріччі 2022-2023 роках (Джерело: [41])

У секторі машинобудування, який є активним споживачем металів, наразі можна виділити виробництво залізничного транспорту та гірничошахтне машинобудування.

Війна дезорганізувала виробництво, що призвело до дефіциту окремих видів металопродукції на внутрішньому ринку. У 2022 році найбільш дефіцитними продуктами на українському ринку були товстий лист понад 10 мм, двотаврові балки, кутники та швелери. Дефіцит заповнюється за рахунок імпорту з Європи.

Щодо виробництва оцинкованого сталевого листа. Через руйнування Маріупольського металургійного комбінату імені Ілліча в Маріуполі, найбільшого виробника цієї продукції, внутрішнє виробництво у 2022 році скоротилося на 74% до 127 тис. тон. Водночас, за даними Метінвест – СМЦ, імпорт оцинкованої сталі (переважно з Туреччини) минулого року зріс на 27% до 84 тис. тон.

Експерти вважають, що після закінчення війни Україна може стати нетто-імпортером металопродукції в кількох секторах. Наприклад, після знищення «Азовсталі» Україна не має власного виробництва залізничних рейок.

Сучасний стан металургії в світі можна охарактеризувати в першу чергу гострою конкурентною боротьбою за ринки збуту, за вигідні тарифи на послуги і продукцію природних монополій. Великий вплив на розвиток металургії надає

динаміка цін на первинне паливо – енергетичне і технологічне (коксівне вугілля, природний газ). В роботах [42, 43] робиться передбачення, що в майбутньому українська металургія буде вирішувати наступні завдання:

- виробництво марочної і якісної продукції для конкурентоспроможності на внутрішньому та світовому ринках;
- зниження витрат на виробництво продукції і в першу чергу за рахунок освоєння енергозберігаючих технологій;
- підвищення частки готової продукції, в першу чергу прокату і труби, в загальному обсязі металургійного виробництва;
- підвищення екологічності виробництва, оскільки українська металургійна продукція інтегрована в глобальні ланцюжки створення цінності;
- диверсифікація ринків збуту, металургійним підприємствам необхідно працювати над розширенням географії поставок, скорочувати залежність від споживачів в країнах з високими ризиками і виходити на нетрадиційні ринки.

1.3 Загальна концепція дослідження проблеми енергозбереження металургійного підприємства

В таких умовах функціонування стає першочерговою реалізація політики енергозбереження на металургійному підприємстві, яка вимагає рішення багатофункціональних завдань: організаційних, правових, фінансово-економічних, технічних, екологічних. В організаційній сфері вирішуються питання створення енергетичних комісій, центрів енергозбереження, спеціалізованих лабораторій та ділянок на підприємствах, що займаються енергетичними обстеженнями споживачів енергоресурсів і режимів їх роботи; складанням, аналізом і оптимізацією енергобалансу і ін. Завдання правового забезпечення вимагають створення та розвиток внутрішньої нормативної бази підприємства, стандартів в галузі енергозбереження. Фінансово-економічна робота в галузі енергозбереження визначається формуванням тарифної політики, інтеграцією обліку енерговитрат в корпоративну систему бухгалтерського обліку і звітності.

Питання ефективного управління енергоспоживанням на металургійному підприємстві в сучасних умовах розвитку економіки набуває особливого значення. Це пов'язано з тим, що в умовах обмеженості фінансових, енергетичних та інших ресурсів наслідки неправильної стратегії та вибору тактичних заходів діяльності підприємства є значними і загрожують виживанню підприємства. Концепція управління енергозбереженням металургійного підприємства визначає його основні пріоритети розвитку, можливості та ризики, що пов'язані із зовнішнім середовищем і внутрішніми організаційними процесами.

В концепції зроблено акцент на використання інформаційних технологій. В дисертаційній роботі розроблена власна концепція (дослідження енергозбереження), що ґрунтується на інтеграції методів аналізу процесів енергоспоживання (енергетичний аудит, аналіз екологічних та економічних ризиків, впливу метеофакторів) з моделюванням комплексу заходів енергозбереження (підвищення точності прогнозування енергоспоживання, візуалізація у вигляді рекурентних діаграм, економетричні моделі). Результатом такої інтеграції є інформаційна технологія, а саме – система моніторингу екологічних та економічних ризиків, що дозволяє вчасно реагувати на відхилення поточних показників від нормативних. Кінцевим результатом оперативного управління на основі інформаційної технології є підвищення енергоефективності металургійного підприємства (рис. 1.5).

Концепція енергозбереження на металургійному підприємстві:

Перший етап: проведення енергетичного аудиту для пошуку шляхів підвищення енергозбереження на металургійному підприємстві «ДНПРОСПЕЦСТАЛЬ» (SWOT-аналіз, аналіз факторів, що впливають на енергозбереження):

- економічні (аналіз економічних витрат на енергоспоживання);
- екологічні (аналіз екологічних ризиків).

Другий етап: визначення шляхів підвищення енергозбереження на металургійному підприємстві «ДНІПРОСПЕЦСТАЛЬ»:

- підвищення точності прогнозування електроспоживання (моделі прогнозування електроспоживання на основі нейромереж, рекурентний аналіз часових рядів електроспоживання);
- врахування кліматичних та сезонних змін і цінових зон електроспоживання (економетричні моделі оцінки впливу метеофакторів (температури, освітленості);
- модель системи моніторингу для ідентифікації та управління еколого-економічними ризиками металургійних підприємств з метою підвищення оперативної дієвості.

Враховуючи багатогранність проблеми енергозбереження в Україні, необхідно провести масштабну роботу зі збору даних та детального аналізу ефективності споживання енергоресурсів на всій території країни та в різних галузях. Це дозволить виявити основні втрати та потенційні резерви. Важливо мати надійну та стабільну державну програму розвитку енергозбереження.

Різноманітність питань, пов'язаних з енергозбереженням, підкреслює потребу в системному аналізі, дослідженні динаміки та оптимізації енергетичного балансу, а також у математичному моделюванні енергоспоживання. Системний підхід до аналізу енерговитрат, енергетичних потоків і тарифної політики дозволяє визначити основні концептуальні напрямки енергозбереження на підприємствах, оцінювати економічну ефективність обраної стратегії та вносити необхідні корективи з урахуванням змінюваних пріоритетів.

Основні можливості для економії енергоресурсів у металургійній галузі полягають у виконанні таких завдань [44]:

- розробка та вибір технологічного процесу з найменшою енергоємністю для отримання кінцевого продукту;
- зменшення споживання найбільш дефіцитних видів пального та електроенергії;
- підвищення ефективності теплових процесів та теплообміну;

– покращення екологічних умов та умов праці.

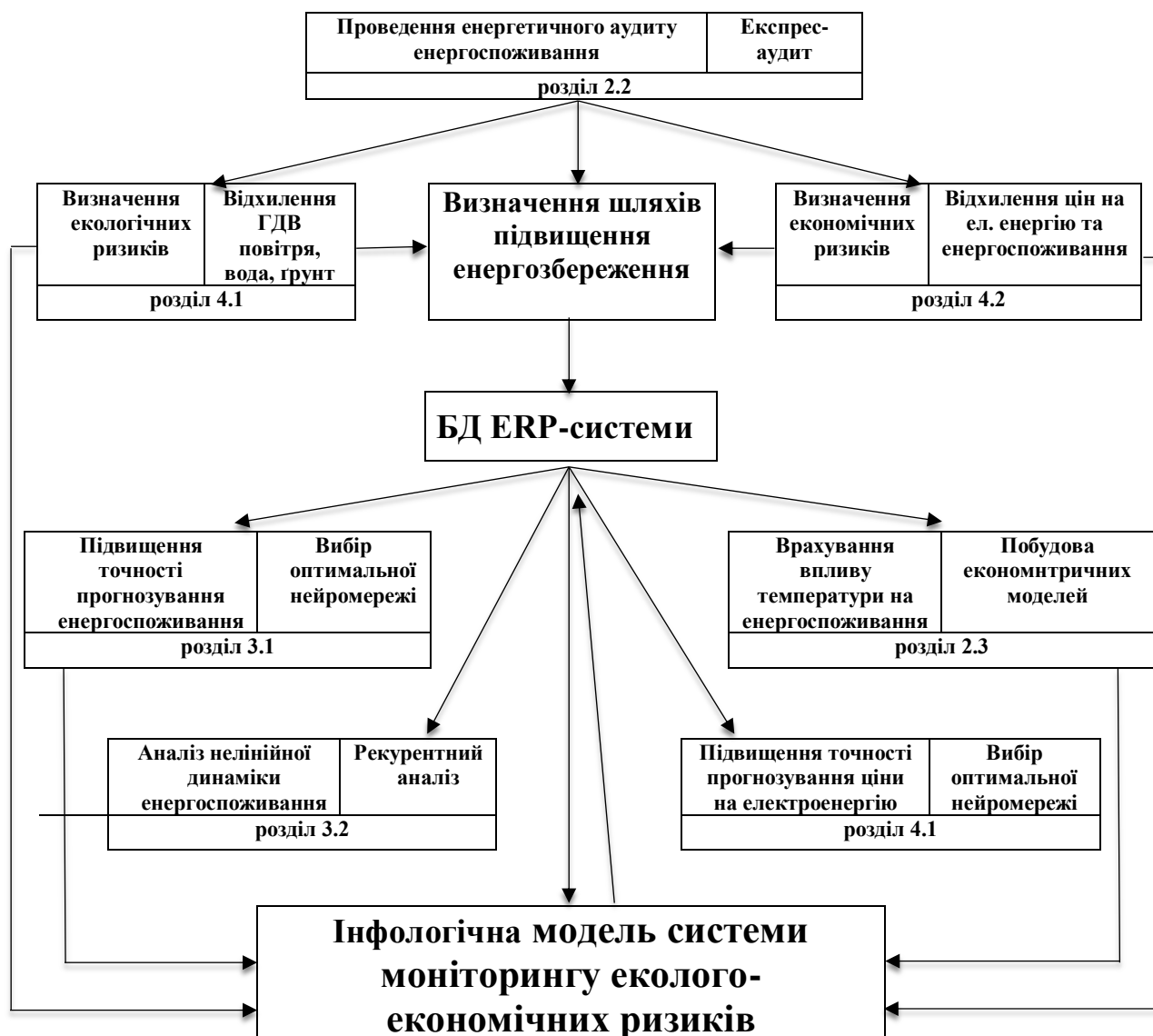


Рисунок 1.5 – Концепція підвищення енергозбереження на металургійному підприємстві, що акцентує використання інформаційних технологій (Джерело: розроблено автором)

Реалізація політики енергозбереження на металургійному підприємстві вимагає рішення багатофункціональних завдань: організаційних, правових, фінансово-економічних, технічних, екологічних. В організаційній сфері вирішуються питання створення енергетичних комісій, центрів енергозбереження, спеціалізованих лабораторій та ділянок на підприємствах, що займаються

енергетичними обстеженнями споживачів енергоресурсів і режимів їх роботи; складанням, аналізом і оптимізацією енергобалансу і ін. Завдання правового забезпечення вимагають створення та розвиток внутрішньої нормативної бази підприємства, стандартів в галузі енергозбереження. Фінансово-економічна робота в галузі енергозбереження визначається формуванням тарифної політики, інтеграцією обліку енерговитрат в корпоративну систему бухгалтерського обліку і звітності, в оцінці ефективності енергозберігаючих проєктів.

Крім того, енергозбереження є одним з ключових напрямків, в якому металургійні підприємства зможуть знизити виробничі витрати і підвищити конкурентоспроможність своєї продукції на ринку [3]. Для вирішення цих проблем **необхідна інформаційна технологія у вигляді системи моніторингу**. Вище зазначені фактори є основою для формування концептуальних положень енергозбереження на металургійних підприємствах, що відповідають поточній ситуації в металургійній галузі в цілому.

До чинників, які сприяють зростанню питомої витрати енергетичних ресурсів, насамперед варто віднести екологічні ініціативи, підвищення рівня безпеки та надійності технологічного обладнання, а також зміни в споживчих характеристиках продукції підприємства, які можуть бути як якісними, так і кількісними.

Одночасно всі **заходи з енергозбереження** можна розподілити на кілька категорій в залежності від типу та складу отриманих економічних вигод:

– заходи в **системі енергопостачання** підприємства, які не впливають на виробничий процес. **Економічний ефект** від реалізації цього напрямку досягається шляхом зменшення витрат на енергію та виробничих витрат, а також оптимізації передачі та розподілу енергетичних ресурсів на ТЕЦ, котельнях, компресорних і холодильних установках тощо; в теплових, електричних та інших енергетичних мережах, а також у трансформаторах та іншому обладнанні, що транспортує, перетворює і акумулює енергетичні ресурси;

– заходи в системі енергопостачання, які впливають на виробничий процес. Під час реалізації таких заходів може змінюватися як кількість, так і якість

енергетичних ресурсів, що передаються з системи енергопостачання до системи енергоспоживання, внаслідок чого відбувається реконструкція або інтенсифікація виробничого процесу. **Економічний ефект** у цьому випадку досягається завдяки економії енергетичних ресурсів і зменшенню витрат на виробництво, передачу та розподіл енергії, а також покращенню якості та кількості самого виробничого процесу (збільшення обсягу випуску продукції, підвищення її якості, зменшення витрат на матеріали та питомих енергетичних витрат).

– заходи в **системі енергоспоживання**, які не впливають на технологічний процес. До таких заходів належать допоміжні системи основних технологічних процесів (опалення, вентиляція, підігрів води, освітлення) та всі операції в допоміжних цехах і службах підприємства, якщо вони не мають прямого впливу на основні технологічні процеси. У таких випадках економічний ефект досягається шляхом зменшення енергоспоживання в допоміжному виробництві та зниження операційних витрат як в основному, так і в допоміжному виробництві;

– заходи, що підвищують **надійність функціонування енергоустановок**. Ці заходи можуть бути реалізовані як у системі енергопостачання, так і в системі енергоспоживання. Економічний ефект у такому випадку визначається за рахунок зменшення збитків від неякісного енергопостачання (перебої в постачанні електроенергії, відхилення параметрів енергії від встановлених норм і вимог у технологічному процесі).

Крім того окремо варто виділити такий напрямок підвищення енергетичної ефективності підприємства як **енергозбереження в будівлях і спорудах**. Такі заходи спрямовані як на виробничі будівлі, так і на адміністративні, і мають, як правило значний потенціал енергозбереження при порівняно невеликій вартості енергозберігаючих заходів. Для розробки енергозберігаючих заходів, спрямованих на будівлі і споруди, необхідно скласти енергобаланс будівель. Тільки після аналізу енергобалансу можна спроектувати певні заходи і спрогнозувати їх ефект.

При визначенні економічної ефективності енергозберігаючих заходів, необхідно враховувати ряд факторів, які можуть **привести до збільшення споживання енергоресурсів**, але в той же час можуть поліпшити виробничий

процес і якість продукції. До **факторів, що збільшують питомі витрати енергоресурсів**, відносяться, перш за все, заходи з охорони навколишнього середовища, підвищення безпеки та надійності технічного обладнання, а також якісні та кількісні зміни споживчих характеристик продукції підприємства.

Використання та впровадження нових енергозберігаючих технологій та обладнання з високим коефіцієнтом корисної дії (ККД) є найбільш витратною частиною проекту і передбачає значні інвестиції. **Енергоефективність виробництва відображається з точки зору енергозберігаючої та екологічно прийнятної інтенсифікації** промислового виробництва, через співвідношення між результатами виробництва та економічно, технологічно і технічно обґрунтованою кількістю енергетичних ресурсів, витрачених на їх досягнення [45]. Таким чином, **сутність процесів енергозбереження виробництва полягає у зменшенні питомих витрат енергії, необхідних для виробництва продукції, раціоналізації режиму енергоспоживання, зміні структури енергоспоживання та підвищенні екологічної ефективності виробництва.**

В цій дисертаційній роботі розроблені наступні методи енергозбереження та запропонована власна концепція для підвищення енергозбереження металургійного підприємства:

- метод прогнозування енергоспоживання металургійного підприємства на добу вперед шляхом створення моделі на базі нейронних мереж;
- метод дослідження особливостей енергоспоживання за допомогою рекурентного аналізу та визначення кількісних показників для аналізу станів поведінки системи;
- метод експрес-енергоаудиту на основі даних про погодинне споживання електроенергії і цінових зон день-ніч, завдяки якому можна отримати додаткову економію коштів для підприємства;
- модель інформаційної аналітичної панелі системи моніторингу економічних та екологічних ризиків з метою підвищення екологічної дієвості, забезпечення економічно ефективного функціонування та розвитку підприємств металургійного комплексу;

– моделі оцінювання впливу метеофакторів (температури, освітленості) на процеси енергоспоживання металургійних підприємств за рахунок застосування багатфакторного економетричного моделювання.

Для структуризації програми енергозбереження необхідно визначити фактори енергозбереження, що визначають ефективність роботи металургійних підприємств, та взаємний вплив між ними.

Уніфікація основних принципів організації металургійного виробництва сприяє виявленню факторів енергоефективності в економічній сфері підприємства:

– економічні: рівень цін і тарифів на паливо та енергію; доступ до ринку ресурсів і нових технологій; інфляція; економічні ризики; ефективність використання виробничих засобів; прибутковість промислового виробництва;

– виробничі: структура промислового виробництва, використання виробничих потужностей, ступінь фізичного та морального зносу обладнання, матеріаломісткість виробництва, технічна трудомісткість, впровадження високих технологій, використання менш енергоємних матеріалів, скорочення всіх видів втрат продукції, рівень електрифікації промисловості, технічне комбінування виробництва.

– організаційні – планування, облік і контроль; удосконалення обліку й нормування ПЕР;

– соціальні – чисельність персоналу, доходи, кваліфікація персоналу;

– екологічні – переробка та утилізація відходів, захист навколишнього середовища, шкідливі викиди від спалювання палива;

– правові – удосконалення законодавчих та правових актів в області енергоефективності й енергозбереження.

На сталість розвитку та ефективність металургійних підприємств негативно впливають нестабільність промислової динаміки, висока ресурсоемність виробництва, низький технічний і кваліфікаційний рівень персоналу та темпи оновлення виробничого обладнання, зростання антропогенного навантаження на довкілля.

Основними характеристиками ефективного менеджменту в сучасних умовах господарювання є:

1. Повне врахування принципів сучасних концепцій сталого розвитку;
2. спрямованість на інноваційний розвиток, оскільки це є єдиним засобом для ефективної перебудови всіх процесів на промислових підприємствах, що дозволяє їм інтегруватися у світовий економічний простір;
3. продуктивна взаємодія між державою та підприємствами вимагає додаткового впливу, оскільки розвиток підприємств полягає не лише в отриманні прибутку, а й у розвитку інтелектуального потенціалу, максимальному використанні науково-технічних досягнень, охороні навколишнього середовища та інших пріоритетних напрямках.

Впровадження на металургійних підприємствах системи енергозбереження дасть економічний ефект за рахунок зниження споживання енергоресурсів при тому ж обсязі виробленої продукції. Головні концептуальні положення підвищення енергоефективності та оптимального застосування матеріальних ресурсів в металургії [44, 45]:

✓ Здійснення комплексу організаційно-технічних заходів, вдосконалення управління – корінне удосконалення системи обліку і контролю витрат ПЕР на всіх рівнях виробництва (найбільш повний моніторинг енергоспоживання), координація дій різних служб і виробництв, велика частота профілактичних ремонтів обладнання, підвищення якості підготовки фахівців і т.п. [7]. Здійснення таких заходів, є і окупається швидко, тому їх здійснення вважається основним завданням.

✓ Ремонт, налагодження та заміна устаткування.

Правильний вибір енергоносіїв. Кожен процес потрібен мати такий енергоносіє, щоб забезпечити найбільший енергетичний та економічний ефект. Вид енергоносія обирають, порівнюючи варіанти та комплексно аналізуючи наступні фактори:

а) вимоги з боку технології (зміна якості продукції, яка випускається, витрата сировини та ін.);

б) економічні відмінності в конструкції і умовах експлуатації устаткування;

в) витрати на порівнювані енергоносії;

г) наявність необхідного устаткування;

д) необхідний період часу для здійснення заміни устаткування;

е) економічний ефект від використання вторинних енергетичних ресурсів (ВЕР), витрати на екологічні заходи. Витрати визначають за виразом [45]

$$Z = \sum K_{\Pi} + B_{\Pi} + E_{\Pi} \cdot \Pi \cdot Z_{\Pi E} - \sum \Delta Z_i \quad (1.1)$$

де K_{Π} – капітальні витрати на цю технологічну установку без урахування витрат на установки використання ВЕР;

B_{Π} – експлуатаційні витрати без енергетичної складової;

E_{Π} – питома витрата енергоресурсів;

Π – річний випуск продукції;

$Z_{\Pi E}$ – приведені питомі витрати на енергоносії;

$\sum \Delta Z_i$ – ефект від використання ВЕР.

✓ Впровадження новітніх високоефективних енергозберігаючих технологій та оснащення. Напевно більш дорогоцінна частина, яка пов'язана зі значними вкладеннями.

Енергоефективність виробництва відображається в результативності виготовлення через співвідношення результатів виробничої діяльності та витрачених на їх придбання економічно, технічно і технологічно аргументованих розмірів енергетичних ресурсів в умовах енергозберігаючої та екологічно прийнятною інтенсифікації промислового виробництва [46]. Сутність процесу збільшення енергоефективності виробництва полягає в зниженні витрат на одиницю продукції енергоносіїв на створення продукції, в раціоналізації режимів енергоспоживання, зміні текстури енергоспоживання, підвищення природного ефективності виготовлення.

1.4 Висновки за розділом 1

У цьому розділі проаналізовано сучасний стан (п. 1.1), політику енергозбереження (п. 1.2), проблему управління енергозбереженням на металургійних підприємствах, розглянуто основні підходи з метою визначення найбільш перспективних напрямків досліджень. Таким чином, науково-прикладна проблема, яка вирішується в дисертації – є розробка моделей та методів, які забезпечать вирішення науково-практичної проблеми управління процесами енергозбереження на електрометалургійному підприємстві з урахуванням динаміки виробничих процесів, стратегічних цілей та ризиків, що дасть змогу підвищити конкурентоспроможність підприємства. Для досягнення поставленої мети була розроблена власна концепція дослідження процесів енергозбереження на металургійних підприємствах, що акцентує використання інформаційних технологій. В подальшому необхідно вирішити такі завдання:

- провести енергетичний аудит для пошуку шляхів енергозбереження на підприємствах та визначення напрямів ефективного енергоспоживання;
- побудувати моделі прогнозування електроспоживання для металургійного підприємства на основі нейронних мереж з метою підвищення точності прогнозування;
- оцінити вплив метеофакторів (температури, освітленості) на процеси енергоспоживання металургійних підприємств з метою врахування кліматичних та сезонних змін;
- розробити моделі системи моніторингу для ідентифікації та управління еколого-економічними ризиками металургійних підприємств з метою підвищення екологічної ефективності, забезпечення економічно вигідного функціонування та розвитку металургійних підприємств;
- дослідити складність динаміки енергоспоживання металургійних підприємств шляхом побудови рекурентних діаграм.

Результати розділу 1 опубліковані в роботах автора : [20], [58], [59].

2 МЕТОДОЛОГІЯ АНАЛІЗУ ПРОЦЕСІВ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ НА ПІДПРИЄМСТВАХ МЕТАЛУРГІЙНОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

Другий розділ присвячений аналізу основних напрямків підвищення енергозбереження та методам енергетичного обстеження на металургійних підприємствах. Здійснено аналіз факторів, що впливають на енергоспоживання металургійного підприємства.

2.1 Методи енергетичного обстеження на металургійних підприємствах: проведення енергетичного аудиту

Вивчення літературних джерел дало змогу створити структурну схему для проведення енергоаудиту [47] (див. рис. 2.1). Нормативною основою для проведення досліджень є сукупність державних стандартів, будівельних норм, законодавчих актів та методичних рекомендацій. Наприклад, енергетичний аудит будівель здійснюється відповідно до Закону України «Про енергетичну ефективність будівель» [48].

До основних принципів проведення енергоаудиту належать наукова обґрунтованість, достовірність, конфіденційність, незалежність та повнота обстеження.

Виявлення способів зменшення енергоспоживання без погіршення технологічних процесів та значних капітальних витрат є складним і багатогранним завданням. Дотримання сучасних нормативних вимог щодо енергетичного споживання окремих підрозділів або підприємства в цілому має бути основним орієнтиром для аудитора. Інформація, отримана під час досліджень, є конфіденційною і не підлягає розголошенню третім особам.

З огляду на специфіку роботи існуючих металургійних підприємств, наразі найбільш пріоритетним є аудит окремих підрозділів, технологічних ліній та систем енергетичного та ресурсного забезпечення.

Після проведення енергетичного аудиту на підприємстві виникає потреба в створенні системи енергетичного менеджменту – організаційної структури, яка контролюватиме рівень енергоспоживання та дотримання енергозберігаючих заходів.



Рисунок 2.1 – Структурна схема проведення енергоаудиту
(Джерело: складено автором за джерелами [47] - [48])

Організаційна структура повинна бути автономною від керівників підрозділів, які підлягають перевірці. Через певний проміжок часу слід здійснювати періодичний аудит, результати якого дозволять оцінити ефективність роботи системи енергетичного менеджменту та рівень впровадження енергоефективних рішень.

При обґрунтуванні економічної доцільності впровадження певного набору заходів з енергозбереження важливо враховувати стан підприємства та організаційні наслідки інвестицій в енергозбереження.

Окремою проблемою є нормування енергоспоживання. Застарілі норми питомого енергоспоживання на виробництво одиниці продукції зараз не є актуальними. Саме по собі поняття “норми енергоспоживання” досить неоднозначне, і вибір їх як критерію енергоефективності, не є доцільним за умов нестабільного режиму виробництва. Для вирішення цієї проблеми пропонується підхід, який використовує весь потенціал енергозбереження. Ця величина є одним із пріоритетів енергоаудиту.

Норма питомої витрати електроенергії – це технічно обґрунтована витрата електроенергії, необхідна для виробництва однієї тони готового прокату в умовах сучасної технології та найвигіднішого режиму роботи обладнання.

При обґрунтуванні економічної доцільності впровадження певної сукупності заходів з енергозбереження необхідно враховувати фінансовий стан підприємства, економічні, технічні, екологічні, виробничі та організаційні наслідки інвестування у енергозбереження [49, 50].

Енергоаудит розглядається як початковий (перший) етап діяльності по формуванню системи енергозбереження. Енергоаудит на металургійному підприємстві можна класифікувати наступним чином (рисунок 2.2).

Найпоширенішим видом проведення енергоаудиту є експрес-аудит. Цей вид обстеження дозволяє у обмежені терміни і за менші кошти визначити основні проблемні напрямки в окремих ланках енергоспоживання [52, 53].

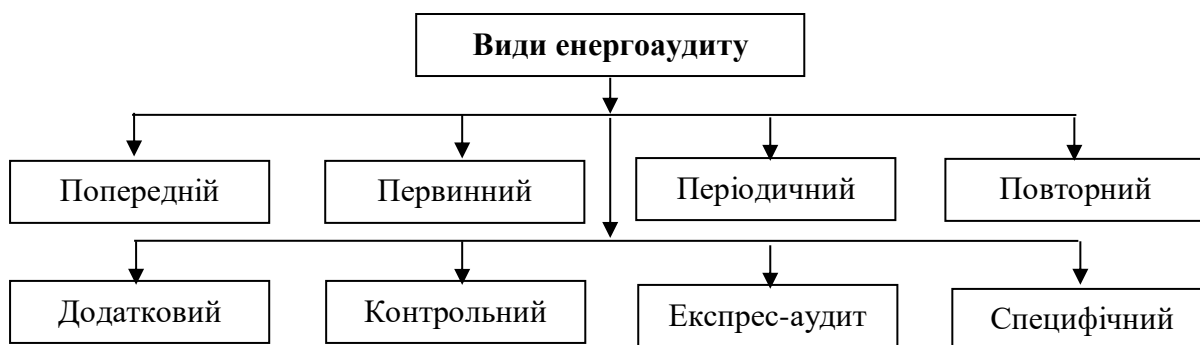


Рисунок 2.2 – Види енергоаудиту

(Джерело: складено автором за джерелами [50] та [51])

На рис. 2.3 наведено дані споживання електроенергії на «ДНІПРОСПЕЦСТАЛЬ» за липень 2019 року за методикою погодинного планування енергоспоживання.

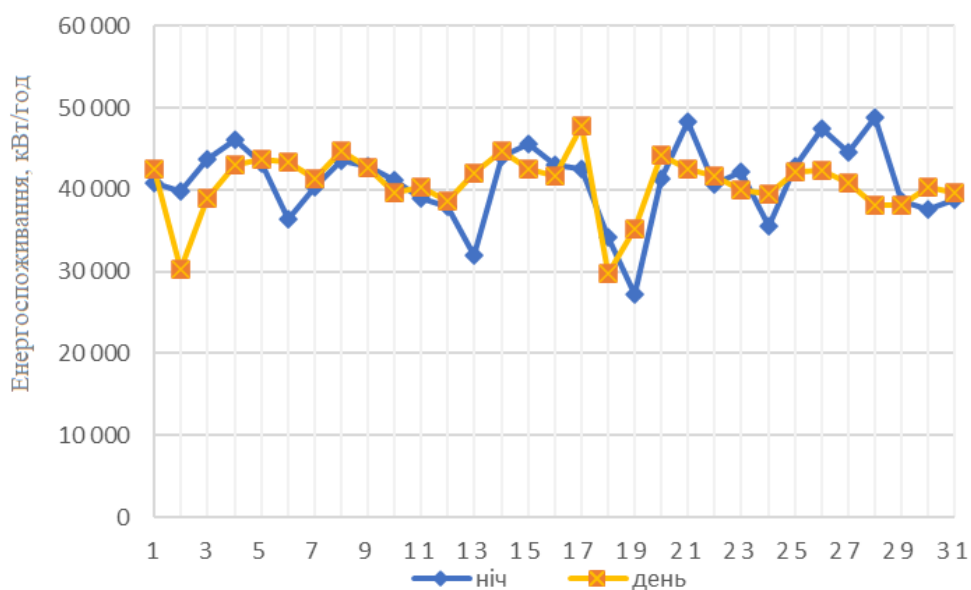


Рисунок 2.3 – Середнє добове енергоспоживання за ціновими зонами ніч-день

(Липень 2019), кВт/год (Джерело: побудовано автором)

Завдяки розбиттю доби на тарифні зони ніч-день можна визначити потенціал енергозбереження та підвищення енергетичної ефективності за рахунок активізації діяльності у нічні години, коли ціна значно нижча (937 грн/МВт*год) та

зменшення її у денні години (2011 грн/МВт*год). Такими потенціалами є 6, 13, 19, 24 та 30 дні місяця (звичайно, якщо це дозволяють технологічні процеси) [54].

Дана інформація необхідна для аналізу енергоспоживання в різні періоди доби та подальшого аналізу отриманого економічного ефекту від прогнозування енергоспоживання на добу вперед, описаного в пункті 4.1.

2.2 Системний аналіз сукупності факторів ризику, що впливають на енергозбереження металургійного підприємства

Щоб вигравати в конкурентній боротьбі, підприємства змушені приймати на себе нові види ризиків, а це, у свою чергу, викликає як необхідність управління ризиками, так і зростаючі вимоги до якості керування.

Таким чином, у сучасних умовах ринкової економіки та зростаючої конкуренції, управління ризиками стає одним із найважливіших елементів системи керування промисловими підприємствами. Крім цього, підприємства стикаються з необхідністю управління не лише окремими видами ризиків, а також побудови комплексної системи управління ризиками. У разі вчинення ризикової події в загальному випадку можливі три результати: негативний (збиток), нульовий, позитивний (прибуток).

Система управління ризиками на підприємстві базується на постійному циклічному процесі виявлення, оцінки та управління ризиками, які можуть вплинути на короткострокові та довгострокові результати діяльності та реалізацію стратегій енергоефективності.

Моніторинг і управління екологічними та економічними ризиками охоплює відстеження виявлених ризиків, контроль залишкових ризиків, виявлення нових ризиків, реалізацію планів реагування на ризики та оцінку їхньої ефективності. У результаті цього процесу необхідно переглянути та оновити плани реагування на ризики, коригувальні заходи, вимоги до змін, а також стандартизовані звіти з управління екологічними ризиками.

Контроль допомагає обирати альтернативні стратегії та вносити корективи для забезпечення основного плану.

Планування процесу управління екологічними ризиками має на меті підвищити ймовірність успішного досягнення загальних результатів у сфері управління ризиками. Це передбачає прийняття рішень щодо вибору, планування та реалізації основного підходу до заходів з управління екологічними ризиками на підприємстві.

На рисунку 2.4 наведена класифікація ризиків енергозбереження.

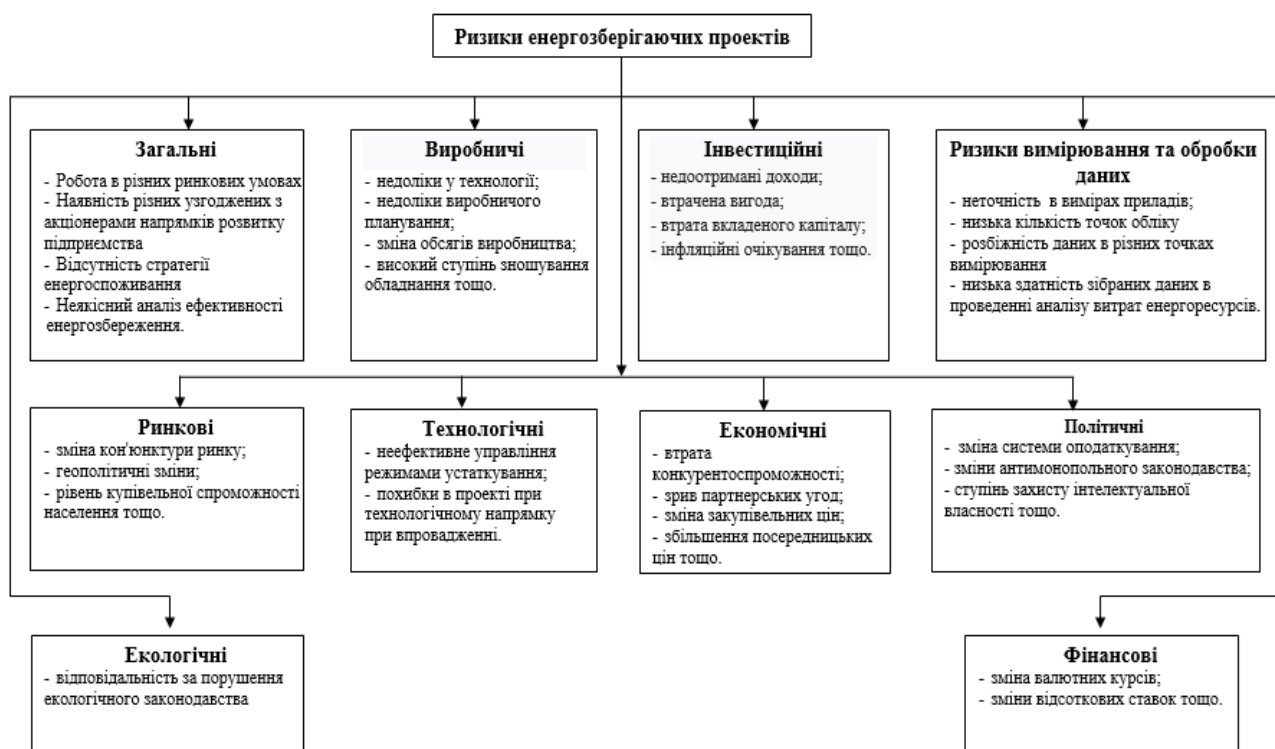


Рисунок 2.4 – Ризики енергозбереження

(Джерело: побудовано автором)

Основними завданнями системи управління ризиками є [55]:

- своєчасне виявлення нових ризиків, що впливають на досягнення цілей програми енергозбереження металургійних підприємств;
- підтримка стабільного фінансового середовища підприємства з урахуванням оцінки ризиків;

– постійний моніторинг ризиків і контроль виконання планів заходів щодо зниження ймовірності виникнення ризиків і мінімізації наслідків їх можливого настання.

2.2.1 Аналіз екологічних ризиків

Промислові підприємства є найпотужнішою причиною комплексного впливу на природні екосистеми і пов'язані з багатьма виробничими процесами, включаючи видобуток, збагачення та переробку корисних копалин для виробництва кінцевої продукції, а також її транспортування та використання. Промислове виробництво завжди пов'язане зі споживанням природних ресурсів і перенесенням відходів та невикористаної енергії в екосистеми [41]. Надзвичайно високе антропогенне навантаження на довкілля в промислових зонах України призвело до критичних рівнів забруднення в багатьох містах, причому деякі показники стабільно значно перевищують гранично допустимі концентрації токсичних речовин. Тому дослідження впливу металургійних підприємств на навколишнє середовище в Україні є важливим і актуальним.

Необхідною є постановка задачі збереження якості атмосферного повітря. Вона полягає в тому, що доцільно було б провести обмеження викидів, наприклад, конкретної шкідливої домішки підприємствами при несприятливих метеорологічних умовах таким чином, щоб сумарні екологічні витрати були мінімальними.

На «ДНІПРОСПЕЦСТАЛЬ» використовуються установки очистки газів електросталеплавильних печей з влаштуванням спеціального електроприміщення та компресорної. Викиди шкідливих речовин, які є джерелами забруднення та перераховані в дозволі на викиди в повітря, здійснюються через труби, яких на заводі налічується 655 штук.

Для запобігання небезпечним забрудненням у приземному шарі атмосфери визначають гранично допустимий викид (ГДВ) в атмосферу. ГДВ встановлюється

для кожного джерела викиду так, щоб вміст забруднюючих речовин у приземному шарі атмосфери від цього джерела (або від сукупності джерел з урахуванням перспективи їх розвитку) при розсіюванні шкідливих речовин в атмосфері не перевищувало норм за якістю повітря. Нормативи гранично допустимих викидів визначаються для кожної речовини окремо.

Значення ГДВ, г/с для одиночного джерела з круглим гирлом у випадках $C_\phi < \text{ГДК}$ визначається за формулою:

$$\text{ГДВ} = \frac{(\text{ГДК} - C_\phi) H^2 \sqrt[3]{V \Delta T}}{A F m n \eta} \quad (2.1)$$

де A – коефіцієнт, що залежить від температурної стратифікації атмосфери (визначає умови вертикального та горизонтального розсіювання шкідливих речовин в атмосферному повітрі);

C_ϕ – фактична приземна концентрація забруднюючої речовини, мг/м³;

F – безрозмірний коефіцієнт, що враховує швидкість осідання частинок забруднюючих речовин в атмосферному повітрі;

m, n – безрозмірні коефіцієнти, що враховують умови виходу газоповітряної суміші з гирла джерела викиду;

η – безрозмірний коефіцієнт, що враховує вплив рельєфу місцевості, у разі рівнинної місцевості дорівнює 1;

H – висота джерела викиду над рівнем землі, м;

ΔT – різниця між температурою газоповітряної суміші, що викидається і температурою навколишнього атмосферного повітря, °С;

V – витрата газоповітряної суміші, що викидається, м³/с.

Якщо з джерела викидається кілька різних забруднюючих речовин, то за висоту викиду приймається найбільше зі значень H , які визначені для кожної речовини окремо і для груп речовин з підсумовуючою шкідливою дією. Збільшення висоти труби завжди знижує рівень забруднення приземного шару.

Екологічний ризик – відхилення (абсолютне та відносне) обсягів викидів шкідливих речовин від граничних норм таких викидів [56].

Об'єктами негативного впливу металургійних підприємств на забруднення навколишнього середовища є атмосфера, стічні води та ґрунт, внаслідок чого має місце перевищення гранично допустимих концентрацій небезпечних речовин. Екологічні ризики можуть привести до іміджевих витрат, які регулюються паризькою конвенцією [5], втрат ресурсів та зниження економічної вигоди металургійних підприємств, що, у свою чергу, призведе до зниження обсягів продажів та платоспроможності підприємства. Внаслідок цього стають нові ризики виникнення збитків для зовнішнього соціально-економічного середовища, а також навколишнього середовища. Це призводить до необхідності використовувати систему управління ризиками в загальній еколого-економічній системі металургійного підприємства.

Планування процесу управління екологічними ризиками покликане підвищити загальні результати процесу управління ризиками і передбачає прийняття рішень щодо вибору, планування та реалізації основного підходу до заходів з управління екологічними ризиками підприємства.

До екологічних показників можна віднести наступні:

- кількість забруднюючих речовин, що викидаються в атмосферу від стаціонарних джерел підприємств-забруднювачів (тон/рік);
- обсяг шлаків у відвалах та рівень їх хімічної безпеки;
- частка промислових відходів, що захороняються, % загального обсягу утворення відходів;
- частка промислових відходів, що переробляються або утилізуються, % загального обсягу утворення відходів;
- частка альтернативних та відновлювальних джерел енергії в загальному обсягу відпуску електричної енергії, %;
- об'єм капіталовкладень в екологічні інновації та оновлення виробництва, грн/рік.

2.2.2 Аналіз економічних витрат на енергоспоживання

Металургійні підприємства є значними споживачами електричної та теплової енергії, тому вирішення питань енергозбереження неможливе без створення комплексної програми та портфеля проєктів, що охоплюють основні напрямки енергозбереження, з обов'язковою координацією з програмою розвитку основного виробництва. Актуальність цих питань зумовлена необхідністю покращення економічної стабільності підприємств, підвищення конкурентоспроможності продукції та зменшення залежності від постачальників енергоресурсів. Наявність цілісної моделі енергоспоживання дозволить оцінити ефективність обраних проєктів реалізації енергозберігаючих заходів, об'єктивно визначити частку кожного енергоресурсу в загальному споживанні, а також встановити енергоємність окремих виробництв, цехів і всього підприємства, що дасть змогу коригувати стратегічний напрямок управління енергоресурсами. Загалом, структура споживання енергії на металургійному підприємстві в основному орієнтована на використання пального, яке широко застосовується.

На підприємстві встановлені прилади обліку, які фіксують фактичне споживання енергоресурсів. Загалом спостерігається невідповідність або дисбаланс між реальним енергоспоживанням підприємства та сумарним споживанням енергії окремими підрозділами.

Щомісячні виробничі показники, що включають продуктивність кожного типу прокатного стану, кількість робочих годин і простоїв, а також щомісячне енергоспоживання (електроенергія, споживана всіма споживачами на підприємстві, природний газ, доменний газ у основному виробництві, інше виробниче обладнання та втрати, технологічна пара), слугують основою для визначення питомих характеристик енергоспоживання в залежності від обсягів виробництва.

$$W_{i,j}^k = f(N_{ij}), \quad (2.2)$$

де $W_{i,j}^k$ – питома витрата енергії k -го виду (Е/Е – електроенергія; ГП – газ природний, ГД – газ доменний, Т – тепло) i -го виробничого підрозділу підприємства за j -й інтервал часу; N_{ij} – кількість продукції, виробленої i -м виробничим підрозділом за j -й інтервал часу.

В якості критеріїв для оцінки ступеня задоволення вимог енергоефективності використовуються наступні [58]:

1. Енергетичний критерій – це витрати куплених енергоресурсів, які споживає металургійне підприємство, виражені в тонах умовного пального. Цей показник розраховується за допомогою формули:

$$B_{pp} = 1.57 \cdot B_{zn}^k + 0.143 \cdot B_m^k + 0.123 \cdot E \quad (2.3)$$

де B_{zn}^k – місячна витрата природного газу, що безпосередньо витрачається всіма споживачами підприємства, т; B_m^k – місячна витрата тепла, що витрачається всіма споживачами підприємства, Гкал; E – місячне споживання підприємством електроенергії, тис. кВт·ч.

2. Економічний критерій – сума витрат на приведену витрату умовного палива, грн/міс, можна визначити за допомогою формул сума витрат на приведену витрату умовного палива, грн/міс, що визначається за формули:

$$C_{np} = B_{zn}^k \cdot C_{zn} + B_m^k \cdot C_m + E \cdot C_e, \quad (2.4)$$

де C_{zn}, C_m, C_e відповідно ціни на природний газ, тепло і електроенергію.

3. Коефіцієнт енергоемності продукції

При розрахунку цього коефіцієнта використовується індекс енергоемності продукції

$$E_E = \frac{E_{\text{сум}}^{\text{вип}}}{Q_{\text{сум}}^n} \quad (2.5)$$

де $E_{\text{сум}}^{\text{вип}}$ – сумарний обсяг спожитих для виробництва продукції енергоресурсів за аналізований період;

$Q_{\text{сум}}^n$ – обсяг випуску продукції.

5. Коефіцієнт частки енерговитрат в собівартості продукції.

При розрахунку цього коефіцієнта використовується розрахунок частки енерговитрат

$$C_E = \frac{E_{\text{сум}}^{\text{вип}}}{C} \quad (2.6)$$

де C – експлуатаційні витрати на виробництво продукції (операційна собівартість).

Розрахунковий ефект отримуємо шляхом порівняння планової C_E^n і фактичної C_E^{ϕ} частки витрат енергоресурсів в операційній собівартості продукції

$$K_{EC}^T = \frac{C_E^{\Pi}}{C_E^{\Phi}} \quad (2.7)$$

2. 2. 3 Вплив метеофакторів на енергоспоживання на металургійних підприємствах

В монографії Belt С.К. [16], яка є фундаментальною працею з енергоменеджменту в металургійній індустрії. Основна думка, що в ній простежується – в металургійній промисловості існують свої унікальні процеси і умови, для яких необхідний більш індивідуальний підхід. Авторка пояснює

загальні методи управління енергоспоживанням в металургійній промисловості та досліджує вплив температури на електроспоживання для процесів енергозбереження. З іншого боку питання впливу метеофакторів є доволі актуальним, вони значною мірою визначають глибокі сезонні коливання та добову нерівномірність графіків споживання.

Планування режимів роботи енергетичної системи – найважливіше завдання в процесі управління нею, від вирішення цього завдання залежить ефективність та економічна рентабельність металургійного підприємства. Для цього розробляється прогноз споживання електроенергії, який є базовим показником. Аналіз ведеться для прогнозування споживання електроенергії та потужності системою в цілому, по групах, а також по окремих вузлах. Результати аналізу зміни споживання електроенергії під впливом метеорологічних факторів застосовуються для оптимального розподілу навантажень.

Кліматичні і географічні особливості, в сукупності з метеофакторами, виникнення природних та техногенних аномалій також призводять до необхідності аналізу факторів їх впливу на рівень енергоспоживання. Точність розрахунків споживання значною мірою визначає балансову надійність енергосистем. Коефіцієнти впливу температури також застосовуються для оцінки приростів споживання за різні роки та формування статистичної і звітної документації [59].

Всі метеофактори можна розділити на три групи (рис. 2.5):



Рисунок 2.5 – Класифікація факторів, що впливають на графік навантаження електроспоживання – (побудовано автором на основі [60, 66, 71])

- періодичні – температура повітря (°C), тривалість світлового дня, тривалість опалювального періоду;
- природні – атмосферний тиск (мм. ртутного стовпця), відносна вологість повітря, напрям вітру, швидкість вітру (м/с), хмарність (%);
- випадкові – радикальні зміни погодних умов у зв'язку з кліматичними умовами.

Радикальні зміни погодних умов пов'язані насамперед зі зміною кліматичних умов. В даному дослідженні будемо розглядати не всі метеофактори, а тільки температуру та хмарність. Також варто зазначити, що при дослідженні впливу метеофакторів на енергоспоживання металургійних підприємств не

враховується день тижня, так як сталеплавильне виробництво є безперервним процесом. А час доби необхідно враховувати, так як в металургії існує поняття розбиття доби на тарифні зони ніч-день, завдяки яким можна визначити потенціал енергозбереження та підвищення енергетичної ефективності за рахунок активізації діяльності у нічні часи, коли ціна значно нижча (937 грн/МВт*год), та зменшення активності у денні часи (2011 грн/МВт*год) [62, 17]. Всі вище зазначені фактори обумовлюють періодичні та нерегулярні коливання електроспоживання.

Температурні зміни мають найбільший кількісний вплив на споживання електроенергії. Показники температури зовнішнього повітря впливають на опалювальні витрати приміщень, а також продуктивність побутових і промислових апаратів: холодильного обладнання, кондиціонерів, вентиляційних систем та ін. Вологість та вітер зазвичай не розглядаються, як визначальні для електроспоживання, проте вони здатні значно посилювати дію основних факторів, що впливають – температури та хмарності.

Залежність енергоспоживання від метеофакторів, і навіть від температури, загалом нелінійна та має досить складний характер. Для оцінки їхнього впливу застосовуються коефіцієнти впливу. Вони відображають лінійний взаємозв'язок відхилень навантаження від регулярної складової $P_{cp}(n)$ (середніх значень) та відхилень температури від регулярної компоненти T_{cp} на 1 °С. Постачальники електричної енергії використовують на практиці коефіцієнт впливу температури. Він досить стабільний і може застосовуватися для аналізу та прогнозу, діапазон коливань становить 0,5-1% на 1 °С. Розглядаючи природні фактори, що впливають на функціонування промислових об'єктів, необхідно відзначити їх сезонність та непередбачуваність. Аномальні коливання особливо сильно позначаються у весняний та осінній періоди, які є сусідніми місяцями до опалювального сезону

Колівання метеорологічних показників можуть викликати нерівномірність енергоспоживання, що призводить до необхідності термінового підключення додаткових потужностей і, відповідно, збою графіків поставки електроенергії, порушення режимів роботи підприємств постачальників енергії, зниження їх економічності, зносу устаткування.

Досліджуючи динаміку залежності навантаження від метеофакторів слід зазначити деяке запізнення, пов'язане з інерційністю впливу температури. Цей фактор відзначається давно та підтверджується багатьма дослідженнями. Для якісної оцінки цього явища можна використати кореляційну функцію. Розрахунок взаємної кореляційної функції показує наявність явно вираженого запізнення змін електроспоживання стосовно змін температури [2, 51].

Далі розглянемо показники температури та хмарності. Введемо відповідні випадкові змінні :

Temp – температура повітря;

Cloud – хмарність як фактор, що впливає на освітленість приміщень.

Будемо вважати, що це незалежні випадкові величини.

Для оцінки параметрів регресійної моделі зазвичай застосовується метод найменших квадратів та його модифікації. Запропонований чисельний метод оцінювання лінійних моделей множинної регресії зі стохастичними змінними реалізовано у економетричному пакеті Gretl, в якому будуються моделі за методологією ARIMA (тобто комбінуються методи авторегресії та ковзного середнього).

Статистичне моделювання зв'язку методом лінійного регресійного аналізу здійснюється в 3 етапи.

На першому етапі проводиться оцінювання параметрів лінійної регресійної моделі однокроковим методом найменших квадратів (МНК або OLS - Ordinary Least Squares). Цей метод дозволяє отримати такі оцінки параметрів, при яких сума квадратів відхилень фактичних значень результативної ознаки (y) від розрахункових (теоретичних) мінімальна. Перевірка адекватності регресійної моделі (перевірки значущості індивідуальних оцінок коефіцієнтів моделі за допомогою t -критерію Стьюдента.

На другому кроці перевірки адекватності моделі оцінюється її значимість (придатність) в цілому, використовуючи показники: F -критерій Фішера, значимість регресії перевіряється шляхом перевірки нульової гіпотези про рівність нулю всіх параметрів моделі (для обраного рівня значущості).

При аналізі рівняння регресії на адекватність для досліджуваного процесу можливі такі варіанти:

– модель за показником F-критерія Фішера, як правило, адекватна, і всі коефіцієнти регресії є значущими. Таку модель можна використовувати для прийняття рішень та робити прогнози.

– модель за показником F-критерія Фішера є адекватною, але деякі коефіцієнти регресії незначущі. У цьому випадку модель можна використовувати для прийняття рішень, але не для прогнозування.

– модель за показником F-критерія Фішера є адекватною, але всі коефіцієнти регресії незначущі. У цьому випадку модель повністю вважається неадекватною. На її основі не приймаються рішення і не здійснюються прогнози.

Робимо обчислення і побудову моделей для нормованих показників. Нормування виконується за формулою (2.8):

$$u_i^{norm} = \frac{u_{max} - u_i}{u_{max} - u_{min}} \quad (2.8)$$

На рис. 2.6 відображене нормоване споживання електроенергії, а також дані температури та хмарності протягом 2018 – 2021 рр. [18] на основі реальних даних на «ДНІПРОСПЕЦСТАЛЬ».

Різне падіння енергоспоживання 2020 р. обумовлене різким спадом виготовлення металопродукції [65] в порівнянні з 2019 роком на 316 366 тис. грн, що складає 82,0%. переважно за рахунок зміни структури реалізації по групах марок сталі, внаслідок зниження об'ємів високолегованих марок та зниження цін на готову продукцію, і було обумовлено тенденціями на ринку металопродукції України та світу.

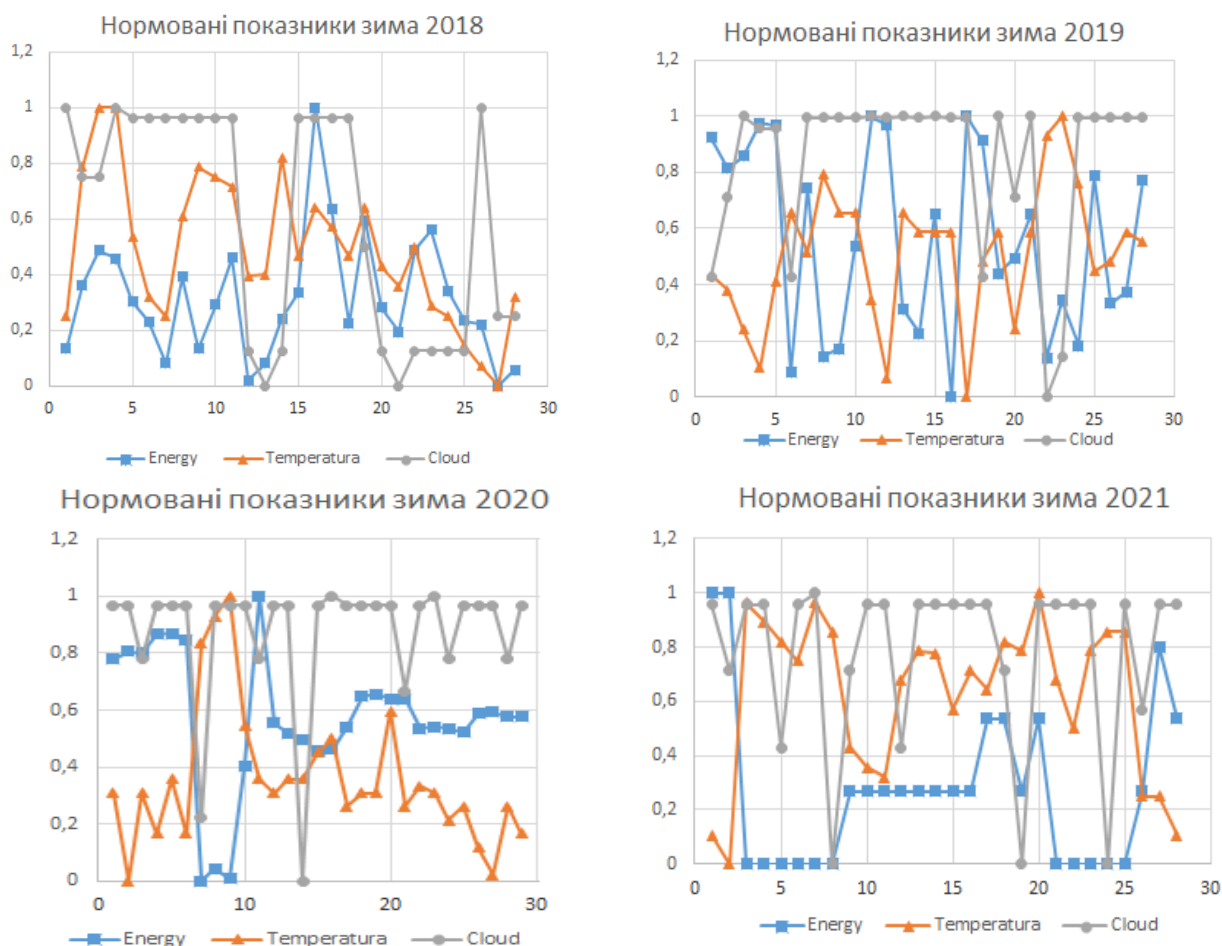


Рисунок 2.6 – Графіки нормованих показників в зимовий період року (лютий) протягом 2018 – 2021 рр.

На підприємствах металургійної промисловості велике значення має освітлення виробничих приміщень. Це пов'язано з складними умовами, у яких доводиться працювати співробітникам – дуже високі температури, вібрації, наявність агресивних завислих частинок. Крім того, висота стель, що перевищує 12 метрів, ускладнює обслуговування освітлювальних приладів. Природне освітлення дозволить значно зекономити кошти на освітлення приміщень. Хмарність дуже впливає на природне освітлення. Дані про температуру та освітленість були взяті з архіву сайту запорізького прогнозу погоди [64].

За графіками рис. 2.7 можна помітити наступну тенденцію залежності енергоспоживання «ДНПРОСПЕЦСТАЛЬ» від температури навколишнього середовища – при різкому зниженні температури значення енергоспоживання

збільшується (наглядно можна спостерігати для зимових періодів 2020 та 2021 років). Такої наглядної залежності в літній період не спостерігається (рис. 2.7).



Рисунок 2.7 – Графіки нормованих показників в літній період року (липень) протягом 2018 – 2021 рр.

У пакеті GRETЛ параметри моделей були оцінені із застосуванням методу найменших квадратів. Інформація була отримана для літнього та зимового періодів впродовж 4 років [63, 64]. Побудовані моделі залежності енергоспоживання Energy від двох незалежних змінних Temp та Cloud. Нижче наведені рівняння двофакторної моделі для зимового та літнього періодів, у дужках вказані стандартні похибки.

В табл. 2.1 наведені значення критеріїв якості побудованих моделей та вказано значущість факторів Temp і Cloud, для чого використано позначення, що прийняті в пакеті Gretl: *** – значущість фактору на рівні 1%; ** – значущість фактору на рівні 5 %; * – значущість фактору на рівні 10 %.

Таблиця 2.1 – Рівняння для двофакторної моделі

	Зима (лютий)			Літо (липень)		
2018	Energy = 0,456 - 0,349*Temp + 0,0601*Cloud (0,122) (0,158) (0,101)			Energy = 0,0516 + 0,504*Temp + 0,293*Cloud (0,0856) (0,124) (0,0984)		
2019	Energy = 1,29 - 1,11*Temp - 0,179*Cloud (0,209)(0,202) (0,166)			Energy = 0,416 + 0,107*Temp - 0,179*Cloud (0,137) (0,194) (0,155)		
2020	Energy = 0,751 - 0,751*Temp + 0,101*Cloud (0,136) (0,129) (0,133)			Energy = 0,0838 + 0,387*Temp + 0,0665*Cloud (0,110) (0,144) (0,0998)		
2021	Energy = 0,666 - 0,690*Temp + 0,0495*Cloud (0,165) (0,156) (0,141)			Energy = 0,171 + 0,397*Temp + 0,0959*Cloud (0,199) (0,217) (0,204)		

За даними таблиці 2.2 можна зробити висновок, що в зимовий період року енергоспоживання значно залежить від температури (2019-2021 рр на рівні 1% і 2018 р на рівні 5%) і зовсім не залежить від хмарності. Щодо літнього періоду можна також стверджувати про залежність енергоспоживання від температури, але вона значно нижча, а в 2019 р. взагалі відсутня. Цікавим є випадок літа 2018 р., коли простежується сильна залежність енергоспоживання від обох факторів, хоча в інші роки знову спостерігається відсутність впливу фактору хмарності.

Таблиця 2.2 – Критерії якості моделей

Рік	Зимовий період					Літній період				
	R ²	Критерій Фішера	Р-значення (F)	Значимість фактору		R ²	Критерій Фішера	Р-значення (F)	Значимість фактору	
				Temp	Cloud				Temp	Cloud
2018	0,22	3,43	0,048	**	–	0,48	13,03	0,000	***	***
2019	0,56	15,9	0,000	***	–	0,05	0,68	0,512	–	–
2020	0,59	18,48	0,000	***	–	0,22	3,91	0,031	**	–
2021	0,45	10,38	0,000	***	–	0,11	1,69	0,202	*	–

Критерій Фішера використовується для оцінки значущості (придатності) моделі у цілому. У побудованих моделях проаналізовано значення даного критерію та прийнято рішення про адекватність моделі в цілому для кожного з 8 випадків.

Для моделі «зима 2018 р.» F-критерій Фішера дорівнює 3,43 для р-значення < 0,048. Оскільки р-значення незначно менше обраного рівня значущості (0,05), то

можна прийняти альтернативну гіпотезу та визнати адекватність моделі в цілому, але $R^2 = 0,22$, що означає низький рівень пояснення моделлю фактичних даних. В наступних моделях, що відповідають зимовому періоду 2019-2021 років р-значення критерію Фішера значно менше рівня значущості 0,01, що дає більшу впевненість в адекватності цих моделей. Також коефіцієнт детермінації приймає значення більше за 0,5, отже відповідні моделі пояснюють фактичні дані на достатньому рівні. Для моделей, що відносяться до літнього періоду на кожен рік є свої особливості: 2018 та 2020 роки – моделі адекватні в цілому, а для 2019 та 2021 років – не адекватні, оскільки в цих випадках р-значення критерію Фішера більше за обраний рівень значущості (0,05).

З урахуванням інформації про значущість факторів в моделях можна зробити висновок, що всі двофакторні моделі (крім літо 2019 та 2021 років) є адекватними, але мають незначущий фактор Cloud (крім «літо 2018 р.»), тому вони в цілому придатні для практичного використання для прийняття рішень, а модель «літо 2018 р.» також придатна і для складання прогнозів.

Для подальших досліджень для побудови прогнозу ми виключаємо із моделі змінну хмарності, яка не є статистично значимою та отримуємо однофакторну модель, за її характеристиками можна оцінити залежність енергоспоживання тільки від одного параметру – температури (Temp).

Енергоспоживання металургійних підприємств залежить від впливу метеофакторів та для достовірного прогнозу споживання необхідно враховувати цей взаємозв'язок, який дозволить аналізувати процес енергоспоживання в динаміці та підвищити ефективність планування, що безпосередньо впливає на економічну рентабельність енергосистеми.

2.4 Висновки за розділом 2

Проаналізовані основні напрямки підвищення енергетичної ефективності та енергозбереження на металургійних підприємствах.

Описано методологію аудиту на металургійних підприємствах. В даному розділі дисертаційної роботи був наведений приклад експрес-енергоаудиту на основі даних про погодинне споживання електроенергії та цінових зон день-ніч на металургійному підприємстві, завдяки якому можна отримати зменшення витрат на енергоспоживання для підприємства.

Вивчені та класифіковані сукупність ризиків енергозбереження металургійного підприємства. Ідентифіковані еколого-економічні ризики металургійних підприємств з метою підвищення екологічної дієвості, забезпечення економічно ефективного функціонування та розвитку підприємств металургійного комплексу.

Визначено вплив метеофакторів на енергоспоживання металургійного підприємства за допомогою побудованих економетричних моделей в пакеті Gretl.

Результати розділу 2 опубліковані в роботах автора : [54], [55], [86], [99].

3 МОДЕЛЮВАННЯ ЗАХОДІВ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ НА МЕТАЛУРГІЙНОМУ ПІДПРИЄМСТВІ

Проаналізовано методи прогнозування добового енергоспоживання на металургійних підприємствах, досліджено застосування методу рекурентного аналізу до процесів енергоспоживання. Наведено приклади розрахунку економічного ефекту від застосування методів прогнозування на добу вперед.

3.1 Моделі прогнозування електроспоживання на основі неймереж

3.1.1 Класифікація методів прогнозування

З метою зменшення економічних втрат при впровадженні комплексу енергозберігаючих заходів необхідно розробити методику оцінки ефективності. Заходи враховують всебічне використання інвестиційних ресурсів, що спрямовуються на їх реалізацію, зменшення енергетичної складової виробничих витрат призведе до забезпечення прийняттого рівня морального та фізичного зносу технічного обладнання. На металургійних підприємствах підвищення вартості енергії призводить до підвищення собівартості, що також може мати негативний вплив на енергетику конкурентоспроможність підприємств.

В даний час для вирішення проблеми енергоефективності розробляються програми з енергозбереження, визначаються системи показників ефективності енергозбереження, проводиться оцінка економічної вигоди від реалізації енергозберігаючих заходів, а також здійснюються комплексні енергоаудити підприємств за підтримки європейських партнерів. Впровадження заходів енергоефективності призведе до позитивних змін у прибутках підприємств завдяки зменшенню витрат.

Прогнозування є важливим елементом у вирішенні питань, пов'язаних з передбаченням майбутніх станів об'єкта, і багато експертів займаються аналізом

даних у сфері енергетики [65, 64]. Сучасні статистичні методи прогнозування дозволяють отримати всі можливі показники з високим ступенем точності.

При аналізі часових рядів можна виділити дві основні мети:

1. визначення характеру часового ряду;
2. прогнозування (передбачення майбутніх значень часового ряду на основі поточних і минулих даних).

Більшість існуючих алгоритмів прогнозування електроспоживання, розроблених у сфері енергетики, є комбінацією різних статистичних методів. Проте якісне моделювання є досить складним завданням через нелінійні зв'язки між факторами та навантаженням, від яких воно залежить. Відомі методи прогнозування споживання електроенергії не здатні працювати з викривленими або неповними даними, тому для ефективного прогнозування споживання електроенергії необхідні нові методи та підходи, які можуть враховувати різні типи інформації.

Більшість алгоритмів прогнозування електроспоживання, розроблених у сфері енергетики, є комбінацією різних статистичних методів. Проте якісне моделювання є надзвичайно складним завданням через нелінійні зв'язки між факторами та навантаженнями, від яких воно залежить. Відомі методи прогнозування споживання електроенергії не здатні працювати з викривленими або неповними даними, тому для ефективного прогнозування необхідні нові підходи, які можуть враховувати різноманітні типи даних.

Основною проблемою існуючих методів є потреба у створенні моделей навантаження та постійному вдосконаленні вже наявних моделей. Ще одним недоліком є те, що залежності між вхідними та вихідними змінними є нелінійними, що призводить до неточності кореляції.

Планування та прогнозування енергоспоживання завжди відіграло важливу роль у процесах закупівлі та реалізації електроенергії. В останні роки, у зв'язку з реформами в українському енергетичному секторі, це питання набуло особливої актуальності.

Згідно з правилами ринку електроенергії, операторам системи розподілу, зокрема НЕК «УкрЕнерго», було доручено здійснювати контроль, а споживачів зобов'язано точно прогнозувати та планувати обсяги електроспоживання. Крім того, вони несуть відповідальність за відхилення від запланованих показників, незалежно від того, чи спожито більше або менше електроенергії, ніж передбачалося. Чим значніша ця розбіжність, тим вищими є фінансові витрати для компанії. Енергопостачальна компанія виконує роль посередника, закупаючи необхідний обсяг електроенергії на ринку та реалізуючи його кінцевим споживачам. Як учасник ринку електроенергії, вона виступає посередником між ринком та споживачем.

Обсяги електроенергії, які енергопостачальне підприємство має закупити на ринку двосторонніх договорів, визначаються відповідно до прогнозованих потреб. Вкрай важливо, щоб цей прогноз був максимально точним, оскільки його похибка може призвести до дефіциту електроенергії для споживачів або, навпаки, до надлишку невикористаної електроенергії, яка потрапляє на рахунок небалансів.

Якщо фактичний обсяг реалізованої електроенергії відхиляється від прогнозованого у більшу або меншу сторону, енергопостачальне підприємство змушене докупувати або продавати надлишок електроенергії за не вигідною ціною. Це відбувається через реалізацію на ринку «на добу наперед», внутрішньодобовому ринку або балансуєчому ринку, що призводить до фінансових втрат. Окрім цього, постачальники електроенергії можуть зазнавати штрафних санкцій, а у разі значних відхилень від плану їх можуть виключити з тендерів. Для компенсації фінансових втрат підприємства змушені підвищувати ціну електроенергії для споживачів. Однак у такій ситуації споживачі, яких не влаштовує зростання тарифів, можуть перейти до іншого постачальника, що пропонує вигідніші умови [66, 67].

На даний момент не існує загальноприйнятої або рекомендованої методології для енергопостачальних компаній щодо складання короткострокових прогнозів споживання електроенергії. Крім того, це завдання часто вирішується фрагментарно. Основною причиною цього є різноманітність динаміки

електроспоживання, а також наявність споживачів із різними профілями навантаження. У зв'язку з цим експерти з різних компаній тестують різні методи прогнозування, оцінюють їхню ефективність та самостійно обирають найбільш підходящий підхід для короткострокового прогнозування електроспоживання [68].

У практичних умовах експерт, який володіє багаторічним досвідом та глибокими знаннями про специфіку електроспоживання, створює прогноз шляхом «ручного наближення графіка електроспоживання». Для цього він відбирає схожі інтервали даних та усереднює погодинні фактичні значення для кожного часового проміжку. Однак такий підхід має низку недоліків. По-перше, значний обсяг неформалізованих знань ускладнює та подовжує процес побудови прогнозу. По-друге, можливі похибки прогнозування, зумовлені як об'єктивними, так і суб'єктивними факторами. Щоб усунути ці проблеми, багато компаній застосовують експертні системи для формування короткострокових прогнозів [69, 70]. Такі системи допомагають експерту знаходити оптимальні рішення в різних ситуаціях. Крім того, за умови можливості навчання та накопичення статистичних даних експертні системи стають ще більш корисними. Функція «уточнення прогнозу» дозволяє застосовувати їх у процесі послідовних ітерацій, коли короткострокові прогнози формуються за різними методами. Це сприяє вибору найбільш ефективної моделі, зниженню ризиків та досягненню максимального економічного ефекту [71].

Залежно від часу прогнозування виділяють три типи прогнозу: короткостроковий, середньостроковий і довгостроковий. Для наочного представлення застосовності моделей залежно від періоду прогнозування згрупуємо їх у таблиці 3.1.

Короткострокове прогнозування – це прогнозування «на завтрашній день», тобто на кілька діб уперед. Для цього застосовуються майже всі відомі методи, зокрема експоненціальне згладжування, ARIMA та нейронні мережі [53].

Середньострокове прогнозування зазвичай охоплює період у межах одного або половини сезонного циклу. Для цього використовуються ті ж методи, що й для короткострокового прогнозування, зокрема ARIMA та експоненціальне

згладжування, що дозволяють контролювати точність прогнозу залежно від його горизонту.

Таблиця 3.1 – Аналіз методів прогнозування [72 – 74]

Метод прогнозування	Тип прогнозу		
	Короткостроковий	Середньостроковий	Довгостроковий
ARIMA	+	+/-	-
Експоненціальне згладжування	+/-	+	-
Регресія	+/-	+/-	+
Нейронні мережі	+	+	+

Існує широкий спектр методів короткострокового прогнозування споживання електроенергії [75], які активно застосовуються промисловими компаніями. Усі основні методи прогнозування електроспоживання можна класифікувати за певними категоріями (рис. 3.1).

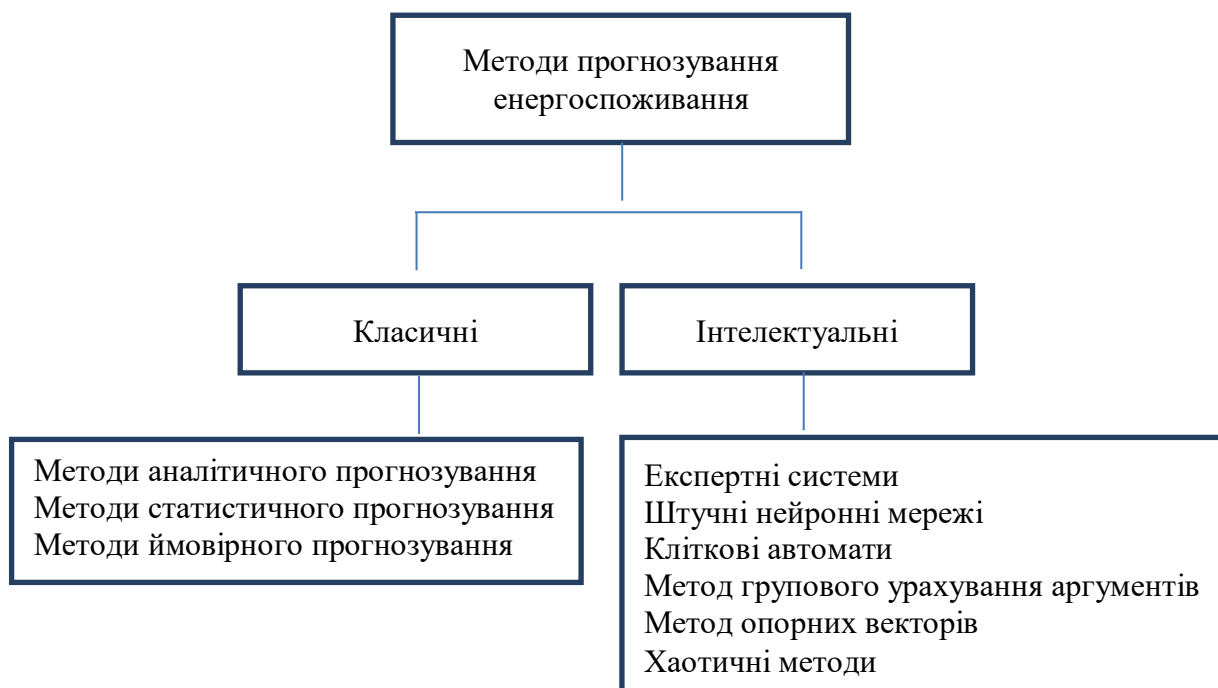


Рисунок 3.1 – Методи прогнозування енергоспоживання – [73]

Усі відомі методи прогнозування можна розділити на три основні групи:

- фактографічні методи;
- гібридні методи;
- експертні методи.

Методи, що ґрунтуються на фактах, спираються на реальні дані про минулий і теперішній розвиток об'єкта прогнозування споживання електроенергії за певний період. Ці методи є найпоширенішими і використовуються для створення моделей прогнозування. Експерти зазвичай мають лише базу ретроспективних даних про споживання електроенергії, яку необхідно спрогнозувати. Група статистичних методів є найбільшою за кількістю та різноманіттям підходів, тому ці методи, які мають однорідну структуру, легко використовувати для статистичного аналізу даних. До них належать параметричні, кореляційні, регресійні та інші індивідуальні методи, що базуються на різних статистичних моделях з використанням усереднення. Також до цієї групи входять методи прогнозування, що використовують нелінійну та лінійну регресію.

Іншим типом методів є «Структурні моделі» [40]. Ця категорія включає методи, які можуть бути структуровані та формалізовані, мають специфічну топологію, а також структуровані зв'язки з об'єктами дослідження, які не залежать від характеристик цих об'єктів. Серед них можна виділити методи на основі нейронних мереж, різноманітні моделі, що використовують методи опорних векторів, а також методи, реалізовані у вигляді дерев рішень.

Експертні або інтуїтивні методи ґрунтуються на знаннях фахівців-експертів підприємства для прогнозування електроспоживання та зосередження їхньої уваги на питаннях розвитку підприємства в майбутньому. Методи експертних оцінок класифікуються за кількістю фахівців-експертів, які беруть участь в опитуванні для прийняття обґрунтованих рішень, в той час як інша група експертів аналізує результати прогнозу на основі різноманітних галузевих суджень [71]. Група гібридних методів базується на методах зі змішаною інформаційною базою, де в якості первинних даних використовуються різні джерела інформації. На рисунку

3.2 представлений один з можливих алгоритмів побудови короткострокового прогнозування енергоспоживання.

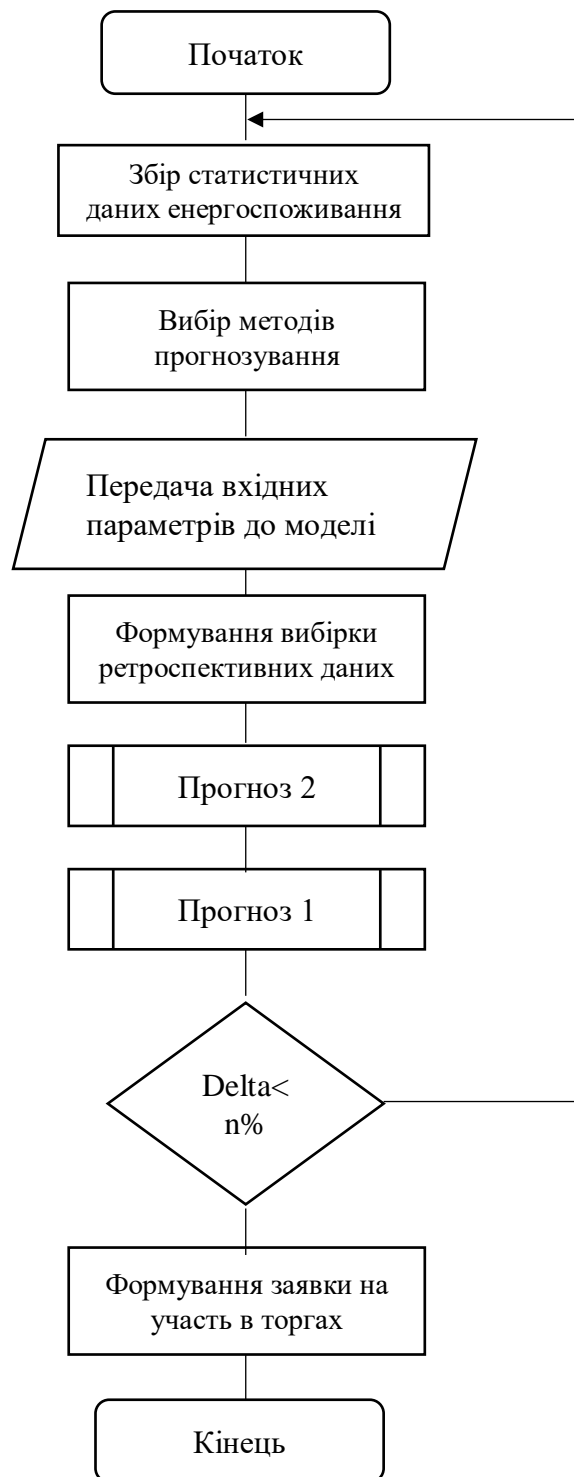


Рисунок 3.2 – Алгоритм короткострокового прогнозування енергоспоживання – [76]

Цей алгоритм дозволяє зменшити похибку прогнозування та виключити апріорні помилкові оцінки експерта. Перед початком створення прогнозу експерт збирає статистичні дані про електроспоживання та характерні ознаки, необхідні для його формування. Потім експерт обирає два найбільш точних методи прогнозування і здійснює сам прогноз, використовуючи інформаційну систему. Результати, отримані за допомогою обраних методів, підлягають оцінці. Якщо значення, що були отримані, відрізняються більше, ніж дані, отримані з ретроспективних розрахунків, вхідні параметри уточнюються, перевіряються на наявність помилок, і процедура повторюється. Коли буде отримано результат, що відповідає встановленим критеріям, погодинні значення з обраного методу вважаються результативними. Однак представлені методи прогнозування не вирішують усіх проблем, оскільки існують також системні питання, пов'язані зі специфікою ринкової моделі та діяльності інших учасників.

Представлені методи прогнозування не вирішують всі проблеми, оскільки існують ще й проблеми системного характеру, які виникають з урахуванням специфіки ринкової моделі і діяльності інших учасників ринку. Подібні проблеми можуть також впливати на вимоги до розробки моделей прогнозування з боку постачальників енергоресурсів.

3.1.2 Методи з використанням нейромереж

В останні роки методи, що використовують штучні нейронні мережі, стали популярними не лише для короткострокового прогнозування електроспоживання, але й для створення середньострокових і довгострокових прогнозів [74, 76, 77]. Для отримання прогнозу нейронна мережа повинна пройти етап навчання, під час якого налаштовуються значення зміщення ваг синапсів, щоб вихідний сигнал мережі максимально наближався до фактичного значення.

На сьогодні існує велика кількість методів навчання нейронних мереж і [78], які також були застосовані в задачах короткострокового прогнозування електроспоживання. Серед переваг нейронних мереж можна виділити швидкі

алгоритми навчання та здатність працювати з шумовими вхідними сигналами. Надійність таких мереж може бути високою, якщо дотримуватися вимог до структури, враховуючи надмірність нейронів, що залежить від кількості та вибору інформативних ознак, сформованих для навчання штучної нейронної мережі.

3.1.3 Вимоги до методу прогнозування електроспоживання підприємства

Методи прогнозування постійно вдосконалюються в процесі еволюції. У більшості досліджень, зокрема в [75], автори, пропонуючи нові підходи до прогнозування або вдосконалюючи вже існуючі, використовують лише параметр «точність моделі» для оцінки їхньої ефективності, що є прийнятним лише для лабораторних умов. У реальних ситуаціях, де прогнозування залежить від численних зовнішніх факторів, цей параметр є важливим, але не може бути єдиним критерієм. Короткострокове прогнозування електроспоживання є специфічним завданням [19, 65], яке вимагає від експерта певних навичок. Це зумовлено тим, що на процес прогнозування впливають численні зовнішні чинники, такі як метеорологічні умови, циклічність, соціальні явища, завантаженість виробничих ліній, постачання сировини та багато інших аспектів. Зазвичай процес прогнозування електроспоживання автоматизовано і реалізовано у вигляді програмних засобів, які дозволяють експерту використовувати різні вбудовані функції. У зв'язку з вищезазначеним, для забезпечення ефективності методів та алгоритмів рекомендується використовувати такі критерії при оцінці якості реалізації методів короткострокового прогнозування електроспоживання.

Важливим етапом у процесі прогнозування є оцінка достовірності моделі. Під час розробки моделі прогнозування вихідні дані діляться на дві частини: одна містить більш свіжу інформацію, а інша – старішу. Перший набір даних слугує для оцінки параметрів моделі прогнозування, тоді як другий набір вважається фактичними даними для прогнозованих показників. Після створення моделі прогнозування отримані результати порівнюються з другою групою даних, що

дозволяє оцінити точність розробленої моделі, тобто її відповідність реальним статистичним даним.

Точність прогнозування є ключовим показником для лабораторних випробувань і має чіткий техніко-економічний сенс. При створенні прогностичних моделей експерт завжди намагається максимально підвищити точність, оскільки це одна з основних задач у сфері енергетики. Існує об'єктивна межа досяжної точності прогнозування електроспоживання, яка називається прогнозованістю електротехнічної системи. Точність також залежить від терміну попередження прогнозу: кожен наступний прогноз, виконаний з меншим терміном попередження, повинен уточнювати попередній, отриманий з більшою завчасністю. Головним практичним критерієм цього параметра є забезпечення точності прогнозування, яка не поступається точності "ручного розрахунку" експерта. Цю вимогу не можна вважати недостатньою, оскільки досвід і інтуїція кваліфікованих експертів надають їм глибоке розуміння причин і характеру змін у електроспоживанні.

Для оцінки точності моделей використовуються різні критерії [76, 77].

1. MAPE – (the mean absolute percentage error), середній абсолютний відсоток помилки (середня відносна помилка прогнозу):

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \frac{|e_t|}{y_t} \cdot 100\% \quad (3.1)$$

де n - число ретроспективних спостережень

$$e_t = y_{tф} - y_{тп} \quad (3.2)$$

де $y_{тф}$ – фактичне значення показника на момент часу; t -й момент часу;

$y_{тп}$ – прогнозоване значення, отримане за допомогою моделі, на t -й момент часу.

2. MAD (Mean absolute deviation) – середнє абсолютне відхилення.

$$MAD = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n |e_t|, \quad (3.3)$$

3. MSE (Mean square error) – середньоквадратична похибка моделі регресії. Висока якість апроксимації даних параметричної моделі свідчить про те, що значення MSE наближається до нуля.

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n e_t^2 \quad (3.4)$$

4. RMSE - (Root mean squared error) – коренева середня квадратична похибка.

$$RMSE = \sqrt{MSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n e_t^2} \quad (3.5)$$

5. MPE - (Mean percentage error), середній відсоток похибки:

$$MPE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \frac{e_t}{y_t} \quad (3.6)$$

MPE відображає відносний ступінь зміщення прогнозу. Високе значення спостерігається, коли фактичне передбачене значення занижується, а втрати при прогнозуванні компенсуються завищенням. Ефективний прогноз має значення MPE, яке повинно наближатися до нуля. Середня процентна похибка не повинна перевищувати 5%.

6. MSEN (Mean Standart Error) – стандартна похибка оцінки. Вона відображає надійність розрахованого значення. Стандартною помилкою називають стандартне відхилення оцінок, які можуть бути отримані з кількох випадкових вибірок однакового розміру з однієї й тієї ж групи даних. Чим менша стандартна похибка, тим вища достовірність оцінки. Стандартна похибка середнього розраховується за такою формулою:

$$SD_x = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (3.7)$$

де σ – величина середньоквадратичного відхилення генеральної сукупності,

n – обсяг вибірки.

Оскільки дисперсія генеральної сукупності зазвичай є невідомою, для оцінки стандартної похибки застосовують таку формулу:

$$SE_x = \frac{S}{\sqrt{n}} \quad (3.8)$$

де S – стандартне відхилення випадкової величини на основі незміщеної оцінки її вибіркової дисперсії

n – обсяг вибірки.

Отримане значення якості інформаційної відповідності прогнозної моделі свідчить про те, наскільки надійно обрана модель відображає майбутні значення досліджуваного явища. Чим точніше модель відтворює минулі дані, тим вища ймовірність, що вона зможе з високою точністю передбачити майбутнє. Таким чином, можна перевірити, чи є обрана модель та її основні припущення придатними до конкретних даних.

Специфікація моделі. Ця вимога визначає особливості роботи моделі прогнозування електроспоживання. Зокрема, модель повинна функціонувати як з усім часовим рядом, так і з його частинами, для яких вона може виявитися неадекватною та не оптимальною. У такому випадку результати моделі повинні давати адекватні прогнози. В іншому випадку, модель може генерувати помилкові значення, що може призвести до фінансових ризиків при недостатньому рівні знань експерта.

Стійкість до помилок в даних. Ця вимога є важливою, оскільки в практиці енергопостачальних підприємств зазвичай використовується кілька джерел даних (інформаційних систем), з яких попередньо збираються дані. Проблема стійкості до помилок у даних зазвичай вирішується шляхом розробки спеціальних засобів для попереднього контролю та обробки інформації. Метод прогнозування електроспоживання також повинен бути стійким до відсутності частини вхідних даних. Ця вимога є особливо актуальною для методів, які, поряд з автоматичним збором даних, періодично потребують введення додаткової інформації (наприклад, про метеорологічні фактори). Тому системи прогнозування повинні включати процедури, що забезпечують надійну роботу навіть у випадку неповних початкових даних.

Адаптивність моделі. Прогностичні моделі повинні мати можливість автоматично оновлювати свої параметри та вдосконалювати прогнози в міру надходження нових релевантних даних до системи.

Економічність означає, що методи прогнозування повинні бути ефективними у використанні обчислювальних ресурсів, таких як час роботи машин і обсяг оперативної пам'яті.

Інтерактивна реалізація забезпечує не лише зручний інтерфейс для користувачів, але й можливість експертам вводити необхідну коригувальну інформацію. Важливими аспектами є якість відображуваних даних та можливість управління набором даних, що демонструються. Визначити найважливіші з наведених критеріїв неможливо, оскільки відсутність будь-якого з них може призвести до збоїв у моделі прогнозування, що, в свою чергу, призведе до помилки в результатах прогнозів споживання електроенергії.

3. 1. 3 Дослідження добового прогнозування енергоспоживання

При побудові моделі прогнозування електроспоживання для металургійного підприємства було поставлено кілька завдань.

1. Побудувати математичну модель для обробки даних про енергонавантаження за певний період часу на основі даних за ретро період;
2. Виконати прогнозування на базі побудованої моделі.

Задача прогнозування енергоспоживання поділяється на ряд підзадач, серед яких:

- описовий аналіз часового ряду, або графічний аналіз. Графічний аналіз дозволяє виявити явні тенденції та закономірності у вихідних даних;
- дослідження часового ряду, а також виявлення регулярних і постійних складових;
- отримання точного прогнозу часового ряду, з урахуванням коливань;
- оцінка якості побудованого прогнозу.

Для прогнозування енергоспоживання «ДНІПРОСПЕЦСТАЛЬ» було використано статистичні дані про погодинне споживання електроенергії протягом доби в осінні місяці року. Вимірювання вхідної інформації здійснювалося в одиницях МВт/год.

З огляду на варіанти навчання та створення прогнозу на початковому етапі дослідження, необхідна нейронна мережа, яка б налаштовувала вагові коефіцієнти так, щоб середньоквадратичне відхилення вихідних значень від еталонних було якомога меншим. Даній вимозі підходить мережа прямого поширення даних і зворотного поширення похибки (Feed-forward backprop - далі FfB) [80]. Така архітектура мережі вимагає її навчання за рахунок завдання цільових значень часового ряду, які повинні бути еталоном при формуванні прогнозу та вхідні дані, які повинні підлягати обробці.

Щоб подати вхідні та цільові значення функції для моделі нейронної мережі необхідно використати архітектуру з нелінійною авторегресією [81], яка представлена на рисунку 3.3.

Отже, була обрана модель нелінійної авторегресії з зовнішніми входами (NARX). Ця модель є рекурентною динамічною мережею зі зворотним зв'язком, що складається з кількох шарів, і базується на авторегресійній моделі.

$$y(t)=f(y(t-1), y(t-2), \dots, y(t-n), x(t-1), \dots, x(t-n)) \quad (3.9)$$

Прогнозоване значення $y(t)$ базується на n попередніх значеннях виходу та n попередніх значеннях часового ряду. На рисунку 3.3 показана схема нейронної мережі, яка була використана в цій роботі.

Мережа NARX є двошаровою мережею зворотного поширення. У прихованому шарі застосовується сигмоїдальна функція як передавальна, а в вихідному шарі – лінійна функція.

Дана модель мережі використовує лінії затримки з відводами для зберігання попередніх значень $x(t)$ і $y(t)$. Варто відзначити, що вихідне значення $y(t)$ подається назад на вхід мережі (через затримку), так як $y(t)$ є функцією, залежною в тому числі від попередніх значень: $y(t-1)$, $y(t-2)$, ..., $y(t-d)$.

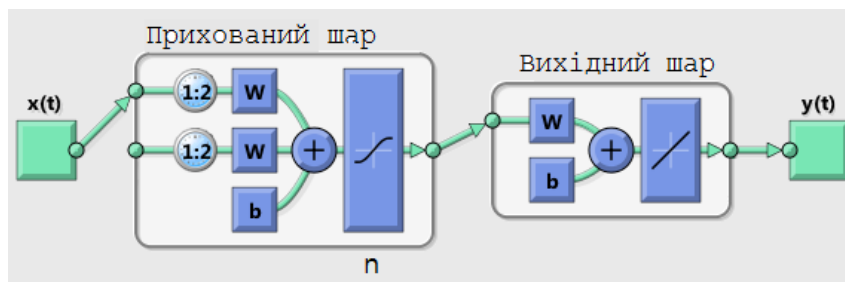


Рисунок 3.3 – Нейронна мережа з розімкненим кільцем зворотного зв'язку
(Побудовано в пакеті Matlab)

У мережі є два входи: один зовнішній, а інший підключений до виходу мережі, звідки отримуються вхідні значення. Для кожного з входів передбачена лінія затримки з відводами для зберігання попередніх значень. Кількість нейронів на прихованому рівні буде визначатися експериментально, а число затримок становитиме 2.

В результаті порівняння трьох вищевказаних алгоритмів навчання та їх прогнозів, було виявлено, що нейронна мережа, навчена за алгоритмом Левенберга-Марквардта, виявляється менш ресурсоємною та показує найменшу похибку прогнозу.

Для підвищення точності роботи нейронної мережі важливо, щоб дані на вході оброблялися відповідно до вагових коефіцієнтів, проходячи через мережу, а потім знову поверталися на вхід, що замінює зворотне поширення похибки.

Замкнуте коло в мережі нелінійної авторегресії дозволяє здійснювати прогнозування на «один крок вперед», тобто передбачати значення $y(t)$ на основі попередніх значень $x(t-1)$, $x(t-2)$, $y(t-1)$, $y(t-2)$ (рис. 3.4). Коло з закритим зворотним зв'язком може бути застосоване для здійснення багатоступінчастого прогнозування. Це обумовлено тим, що прогнозовані значення $y(t)$ використовуватимуться замість реальних майбутніх значень $y(t)$.

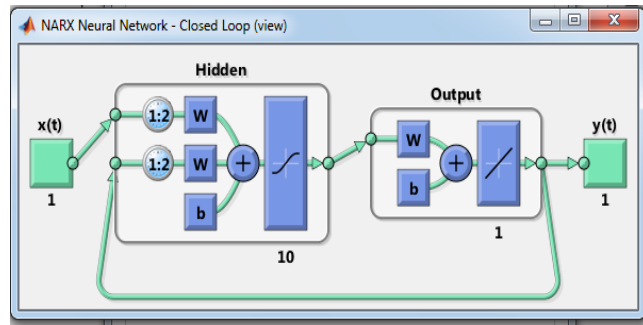


Рисунок 3.4 – Нейронна мережа з замкнутим кільцем зворотного зв'язку
(Побудовано в пакеті Matlab)

Для побудови вищеописаної нейронної мережі розглянемо послідовність дій, яку потрібно зробити. Спочатку потрібно визначитися з вхідними та вихідними даними. Так як завдання полягає в прогнозуванні часового ряду, то в якості вхідних даних будуть використані номери часових проміжків по порядку, а в якості вихідних – значення аналізованого показника енергоспоживання, відповідне часу, поданому на вхід мережі.

Для ефективного навчання нейронної мережі важливо розділити всі дані на три підмножини. Перша використовується для тренування мережі, тобто коригування ваг. Як правило, більшість тестових зразків відносять до цієї підмножини.

Друга частина даних необхідна для уникнення перенавчання мережі. Контроль навчання відбувається через обчислення похибки на цих даних. На ранніх стадіях навчання похибка має зменшуватися, а її зростання вказуватиме на перенавчання. Отже, навчена мережа матиме ваги, які забезпечать мінімальну похибку на перевірчому наборі.

Третя підмножина – тестова. Вона не застосовується в процесі навчання, але корисна для порівняння різних моделей як незалежне випробування навченої мережі. До того ж, тестова підмножина може вказувати на неякісний розподіл вихідних даних, якщо мінімальні помилки на ній та валідаційній підмножині досягаються у дуже різних ітераціях. У даній роботі для другої та третьої підмножин виділено по 15% даних.

Інший підхід до прогнозування енергоспоживання – глибоке навчання. Глибока нейронна мережа дозволяє обробляти великий обсяг вхідної інформації за малий час, має можливість будувати залежності при неінформативній вхідній інформації, виявляти приховані залежності між вхідними та вихідними даними.

Нейронні мережі з довгою короткостроковою пам'яттю LSTM (long short-term memory – мережі довгої короткострокової пам'яті) були створені в якості модифікації рекурентних нейронних мереж (RNN), в яких є можливість зберігати та обробляти інформацію на відносно довгий період часу. Будь-яка рекурентна нейронна мережа має форму ланцюжка повторюваних модулів нейронної мережі.

Базові компоненти мережі LSTM – вхідний шар послідовності та шар LSTM. Шар LSTM вивчає довгострокові залежності між часовими кроками даних послідовності. Схема на рисунку 3.5 ілюструє архітектуру простої мережі LSTM для прогнозування. Мережа запускається з вхідного шару послідовності Sequence Input, що забезпечує шар LSTM. Щоб передбачити мітки класу, закінчується повнозв'язним шаром Fully Connected, шаром softmax та регресією вихідного шару Regression.



Рисунок 3.5 – Архітектура мережі LSTM

Щоб передбачити значення майбутніх часових кроків послідовності можна навчати мережу LSTM від послідовності до послідовності, де відповіді є навчальними послідовностями зі значеннями, перемикання одним часовим кроком. Таким чином, на кожному часовому кроці вхідної послідовності мережа LSTM вчиться передбачати значення наступного часового кроку. Навчання такої мережі здійснюється за допомогою методу adam–adaptivemomentestimation, оптимізаційний алгоритм [80]. Точність прогнозування оцінюється як середня

абсолютна помилка у відсотках (формула 3.3). З аналізу публікацій [79, 82, 83], прийнятною є помилка прогнозу не більше 5%.

В середовищі Neural Network Toolbox є можливість використання таких алгоритмів навчання нейронних мереж: нелінійної оптимізації Levenberg-Marquard, метод Bayesian Regularization та метод сполучених градієнтів (Scaled Conjugate Gradient), - які докладно описані в джерелах [7, 13].

Для об'єктивності порівняння показників якості прогнозування при застосуванні різних алгоритмів прогнозування з використанням відповідної архітектури побудови нейронної мережі був вибрана одна й та сама дата (на вхід подається один і той масив даних), що дозволило найбільш точно порівняти результати отриманих прогнозів.

При моделюванні процесу електроспоживання в енергосистемі на початковому етапі була обрана мережа, що має архітектуру прямого поширення даних і зворотного поширення помилки (Feed-forwardbackprop, або – FfB) та навчена за алгоритмом Levenberg–Marquardt Algorithm. Результати навчання нейронної мережі в Matlab представляються наступним чином (рисунок 3.6).

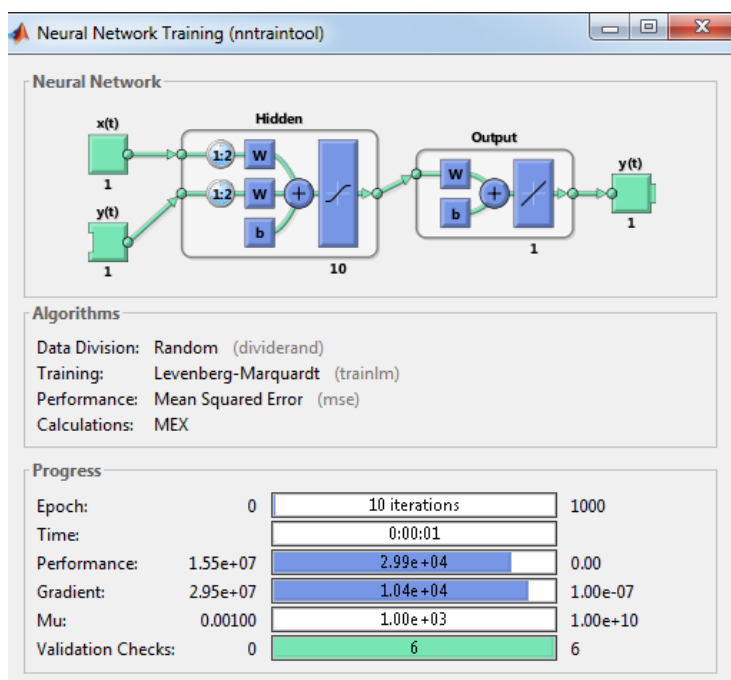


Рисунок 3.6 – Результати навчання нейронної мережі виконаного за Levenberg-Marquardt Algorithm на архітектурі моделі FfB
(Побудовано в пакеті Matlab)

На наступних етапах дослідження був застосований той самий тип архітектури, FfB, але змінювався алгоритм навчання: спочатку Bayesian regularization algorithm, далі – метод сполучених градієнтів.

За отриманими результатами порівняння сформованого прогнозу від фактичних значень з використанням різних алгоритмів навчання на архітектурі FfB представлені на рисунку 3.7.

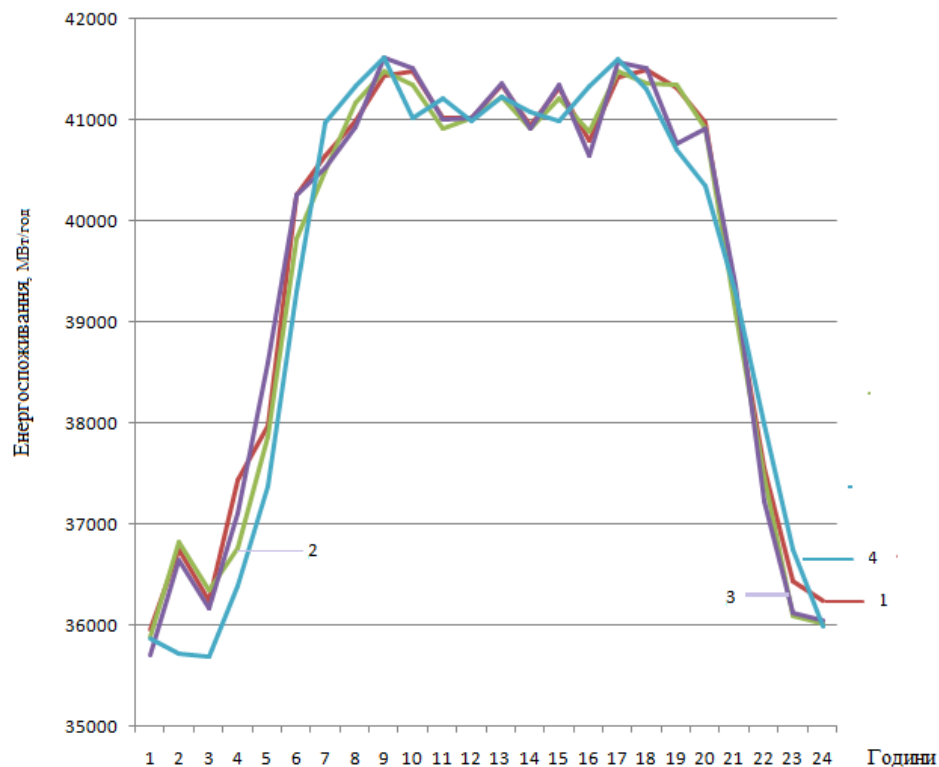


Рисунок 3.7 – Результати прогнозування енергоспоживання з використанням нейронної мережі

де 1 – Фактичне значення енергоспоживання

2 – прогнозне значення енергоспоживання за Levenberg-Marquardt Algorithm

3 – прогнозне значення енергоспоживання за Bayesian regularization algorithm

4 – прогнозне значення енергоспоживання за методом сполучених градієнтів

На відміну від розглянутих вище нейронних мереж для прогнозування за допомогою мережі LSTM необхідна окрема програмна реалізація.

Послідовність програмної реалізації глибокого навчання:

- 1) імпортуємо дані з середовища Excel;
- 2) розділяємо дані на навчальну вибірку та тестову.
- 3) стандартизуємо дані щоб мати нульове середнє значення і модульне відхилення;
- 4) створюємо мережу регресії LSTM. Задаємо шар LSTM, що має 5 прихованих модулів;
- 5) задаємо опції навчання. Вказуємо алгоритм 'adam' і навчаємо LSTM з заданими опціями навчання за допомогою `trainNetwork` протягом 250 епох. Щоб перешкоджати тому, щоб градієнти вибухнули, встановлюємо поріг градієнта до 1;
- 6) щоб спрогнозувати значення декількох часових кроків в майбутньому, використовуємо функцію `predictAndUpdateState`;
- 7) щоб ініціювати мережевий стан, спочатку прогнозуємо на навчальних даних `XTrain`. Потім робимо перший прогноз за допомогою останнього часового кроку навчальної відповіді `YTrain (end)`.

Результати прогнозування з мережею LSTM показані на рисунку 3.8.

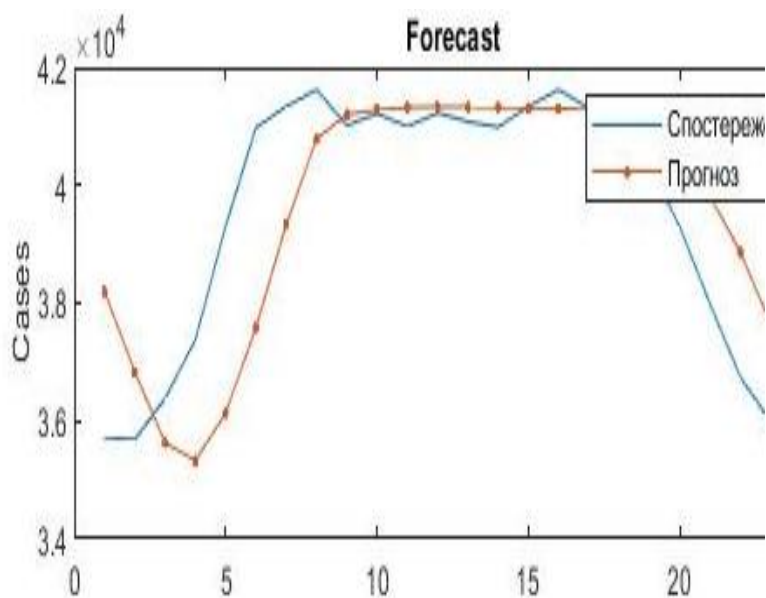


Рисунок 3.8 – Відображення фактичних та прогнозних значень за мережею LSTM

Таблиця 3.2 – Характеристики навчання нейронної мережі

Параметри	Мережа прямого поширення даних і зворотного поширення похибки			Глибинна мережа
	Levenberg-Marquardt Algorithm	Bayesian regularization algorithm	Сполучені градієнти	Мережа LSTM
Кількість епох	10	211	7	250
Час навчання	0:00:01	0:00:05	0:00:01	0:00:05
Точність прогнозування: відхилення від факту, %	2,87	3,07	3,27	2,59

Схожі завдання з прогнозування були виконані за допомогою мови Python, оскільки вона є найпоширенішою мовою для таких задач і має безліч бібліотек, які спрощують процес розробки.

```
import numpy as np
import pylab as pl
import neurolab as nl
import numpy as np
```

Рисунок 3.9 – Код імпорту бібліотек Python

Для реалізації моделей нейронних мереж застосовується популярна бібліотека TensorFlow разом із фреймворком Keras, який є одним з найшвидших фреймворків для вирішення подібних задач. Він має велику кількість документації, що сприяє швидшому написанню коду, а також дозволяє завантажувати набори даних і використовувати попередньо навчену модель VGG16.

Так, наприклад, за допомогою вбудованих функцій можна встановити алгоритм навчання на градієнтний спуск та навчити мережу:

```
multilayer_net.trainf = nl.train.train_gd
error = multilayer_net.train(input_data, output_labels, epochs=500, show=100,
goal=0.03)
```

Кількість епох «epochs» відноситься до кількості ітерацій повного набору даних для навчання, які мережа повинна пройти, перш ніж зупинитися. Параметр «show» пов'язаний з відображенням прогресу кожні 100 епох. Параметр «goal»

вказує максимально припустиме відхилення фактичних та прогнозних даних. Алгоритм навчання зупиняється в одному з двох випадків: перший – досягнуто максимальної кількості епох, другий – відхилення фактичних та прогнозних значень не перевищує параметр «goal».

При побудові прогнозу за допомогою мови Python використовувалися наступні алгоритми навчання нейронних мереж: `train_gd` – зворотне поширення градієнтного спуску, `train_gdm` – градієнтний спуск зі зворотнім поширенням імпульсу, `train_gda` – градієнтний спуск з адаптивною швидкістю навчання, `train_gdx` – градієнтний спуск зі зворотнім поширенням імпульсу та адаптивним LR, `rain_grprop` – стійке зворотне поширення.

Для забезпечення об'єктивності порівняння показників якості прогнозування, що здійснюється за допомогою різних алгоритмів і відповідних архітектур нейронних мереж, було обрано один і той самий день. Це дало змогу найбільш точно оцінити результати отриманих прогнозів.

Таблиця 3.3 – Порівняння різних алгоритмів навчання

Параметри	<code>train_gd</code>	<code>train_gdm</code>	<code>train_gda</code>	<code>train_gdx</code>	<code>train_prop</code>	Мережа LSTM
Кількість епох	743	800	850	435	654	250
Точність прогнозування: відхилення від факту, %	0.00829	0.0053	0,0049	0,0052	0,0049	0,0026

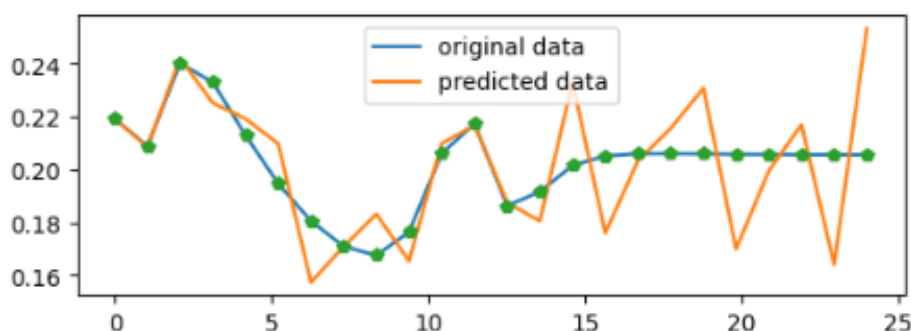


Рисунок 3.10 – Прогнозування за допомогою багат шарового перцептрона (метод навчання – `train_gd`)

Також буда розроблена програма прогнозування для того ж самого дня за допомогою мережі LSTM (рисунок 3.11).

За даними досліджень найкраща серед використаних нейронних мереж для цього навчання є мережа LSTM. Максимальна похибка прогнозування становить 2,59% по модулю за добу. В абсолютному вираженні це 1069,76 МВт.

Використання штучних нейронних мереж дозволяє підвищити ефективність прогнозування споживання, а також розглянути динамічні процеси, що відбуваються в енергосистемі, які впливають на природу електрики споживання і потужності, що підвищує точність прогнозування.

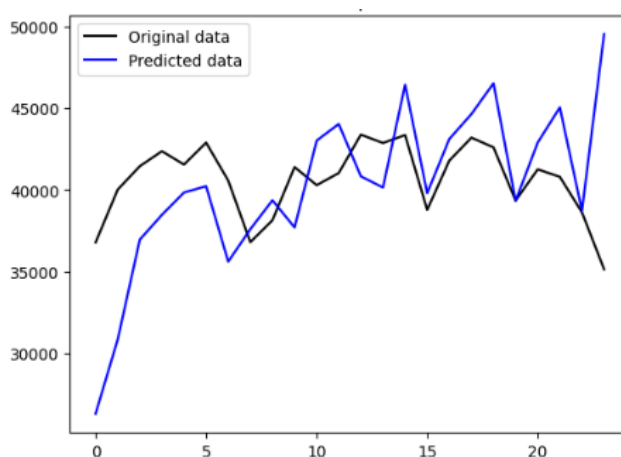


Рисунок 3.11 – Відображення фактичних та прогнозних значень за мережею LSTM

Під час проведення досліджень вдалося отримати досить точний прогноз, використовуючи мінімум вхідної інформації. Мається на увазі те, що на вхід мережі подається лише значення енергоспоживання, а всі особливості ряду (тренд, циклічна та випадкова складова), а також зовнішні фактори, що впливають на поведінку тимчасового ряду, не враховуються. І, тим не менш, отриманий прогноз говорить про те, що нейронна мережа здатна відновлювати функцію без додаткової інформації, яка часто може бути зовсім невідома. У цьому і полягає безперечна перевага нейронної мережі порівняно з іншими способами прогнозування. Короткостроковий прогноз є більш ефективним і рекомендується для прогнозування електричного навантаження під час використання запропонованої глибокої нейронної мережі. Це зумовлено насамперед відсутністю будь-якої

допоміжної інформації, крім часу, яка, безумовно, підвищила б точність отриманого прогнозу.

3.2 Метод рекурентного аналізу енергоспоживання на металургійних підприємствах

3.2.1 Побудова рекурентних діаграм часових рядів електроспоживання

Металургійне підприємство є складною динамічною системою, як було сказано в попередніх розділах.

Складні динамічні системи характеризуються динамікою з нерегулярною поведінкою, яка проявляється як у випадкових, так і в детермінованих хаотичних процесах. У практичному аспекті така система представлена часовим рядом – дискретною послідовністю випадкових величин, впорядкованих у часі, що відображають стан об'єкта спостереження. Аналіз динаміки цього ряду, отриманого внаслідок вимірювань або моніторингу параметрів досліджуваної системи, необхідний для оцінки її передбачуваності та подальшого розуміння механізмів її функціонування.

Дані досліджуваних систем зазвичай виявляють нестационарну та часто складну поведінку. Крім того, спостереження таких систем зазвичай проводиться за обмеженою кількістю вимірювань, що призводить до отримання коротких рядів даних. Лінійні методи аналізу часових рядів часто не підходять для вивчення таких даних, тоді як більшість нелінійних підходів вимагають довгих або стаціонарних рядів.

Відносно новим методом аналізу складних динамічних систем є чисельний рекурентний аналіз. Це один із небагатьох нелінійних методів, що дозволяє кількісно оцінювати процеси, представлені короткими часовими рядами. Його основою є рекурентність – властивість динамічних систем повторювати певні стани. Оскільки рекурентність є фундаментальною характеристикою динамічних

систем, вона може використовуватися для дослідження поведінки системи у фазовому просторі.

Основна перевага цього методу полягає у можливості дослідження багатовимірних траєкторій у фазовому просторі через їх двовимірне представлення. Рекурентні діаграми, які застосовуються для аналізу часових рядів, допомагають візуалізувати приховану структуру даних та виконувати їх кількісну оцінку. За їх допомогою можна визначити характер динамічних процесів у системі, рівень впливу шуму та дрейфу, наявність повторюваних чи стаціонарних станів, екстремальних подій, прихованої періодичності та циклічності.

Метод отримав ще більшу увагу після впровадження підходу кількісної оцінки рекурентних діаграм та дослідження їх взаємозв'язку з фундаментальними властивостями динамічних систем [83].

Рекурентність означає зближення достатньо довгого відрізка фазової траєкторії з її попереднім фрагментом. У випадку періодичних коливань таке зближення відбувається регулярно та передбачає повний збіг траєкторій. Натомість у разі нерегулярних, аперіодичних детермінованих коливань фрагменти фазової траєкторії зближуються хаотично. Важливою особливістю рекурентності є її здатність відрізнити детерміновані коливальні процеси від випадкових коливань.

Розглянемо детальніше методологію рекурентного аналізу, спираючись на роботу Марвана та його колег [84]. Нелінійний аналіз даних ґрунтується на дослідженні траєкторій у фазовому просторі, де кожен елемент представляє можливий стан досліджуваної системи. Припустимо, що стан такої системи у фіксований момент часу t можна описати за допомогою d компонент, які формують вектор у d -вимірному фазовому просторі.

$$\vec{x}(t) = (x_1(t), x_2(t), \dots, x_d(t))^T \quad (3.10)$$

Отже, вектор $\vec{x}(t)$ задає траєкторію у фазовому просторі.

Рекурентна діаграма використовується для візуалізації цієї траєкторії $\vec{x}_i \in \mathbf{R}^d$ у d – вимірному фазовому просторі на двовимірну двійкову квадратну матрицю розміром $N \times M$:

$$R_{i,j}(\varepsilon) = \Theta(\varepsilon_i - \|\vec{x}_i - \vec{x}_j\|), i, j = 1, \dots, N \quad (3.11)$$

де N – кількість станів \vec{x}_i ,

ε – порогова відстань,

$\theta(\cdot)$ – функція Гевісайда ($\theta(x) = 0$, якщо $x < 0$, і $\theta(x) = 1$ в протилежному випадку),

$\|\cdot\|$ – норма,

M – розмір матриці.

Форма околу, яка визначається відповідним параметром ε_i , залежить від вибраної норми та центрована відносно заданої точки \vec{x}_i , тобто радіус околу у фазовому просторі встановлюється відносно цієї точки \vec{x}_i . У разі одновимірного часового ряду замість околу використовується інтервал із центром у певній точці \vec{x}_i . Якщо інша точка \vec{x}_j потрапляє в середину цього околу, то відповідний стан \vec{x}_j вважається подібним до стану \vec{x}_i , і на рекурентній діаграмі позначається точкою $R_{i,j} = 1$. Радіус ε_i може бути постійним для всіх x_i , так і змінюваним для кожної окремої точки, щоб забезпечити постійну кількість подібних станів у визначеній області. Зазвичай застосовується фіксоване значення радіусу ε_i , що дозволяє отримати симетричну рекурентну діаграму відносно головної діагоналі $R_{i,j} = 1$, при цьому головна діагональ матриці відстаней, у якої індекси рядків і стовпців збігаються ($i = j$).

Тобто рекурентність \vec{x}_i та \vec{x}_j визначається як міра близькості стану \vec{x}_i до стану \vec{x}_j . При побудові рекурентних діаграм найчастіше використовується норма L_∞ через її простоту та швидкість обчислення.

Рекурентну діаграму отримують шляхом формування рекурентної матриці (3.16) та візуалізації її двійкових значень за допомогою різних кольорів (зазвичай чорний для $R_{i,j} = 1$ та білий для $R_{i,j} = 0$). Обидві координатні осі при цьому є часовими. Оскільки, за визначенням, $R_{i,j} = 1$ при $i=j$, то рекурентна діаграма завжди містить чорну головну діагональну лінію, яка називається лінією ідентичності. Крім того, з означення випливає, що рекурентна діаграма є симетричною відносно головної діагоналі, оскільки виконується нерівність $R_{i,j} = R_{j,i}$ для будь-яких $i, j = \overline{1, N}$.

Основне призначення рекурентних діаграм — це візуальний аналіз траєкторій у багатовимірних фазових просторах, що дозволяє оцінити їхню еволюцію з часом. Рекурентна діаграма містить як великомасштабні, так і дрібномасштабні структури, які відображають динамічний стан системи.

Великомасштабна структура діаграми визначає її топологію та дає загальне уявлення про характер досліджуваного процесу. Основними типами топології рекурентних діаграм є:

- а) однорідна — характерна для стаціонарних і автономних систем;
- б) періодична — відповідає осцилюючим системам;
- в) дрейф — властивий системам із повільно змінюваними параметрами;
- г) контрастні області або смуги — вказують на різкі зміни в динаміці системи.

Текстура рекурентної діаграми формується за рахунок таких дрібномасштабних структур:

а) **діагональні лінії** — відображають подібну локальну еволюцію різних фрагментів траєкторії;

б) **горизонтальні та вертикальні лінії** — свідчать про стан системи, який залишається незмінним або змінюється мінімально протягом певного часу;

в) **окремі рекурентні точки** – не містять безпосередньої інформації про стан системи, але можуть відображати випадкові збіги.

3.2.2 Кількісні оцінки рекурентних діаграм

Кількісний аналіз дає змогу оцінювати рівень складності структур рекурентних діаграм, спираючись на щільність рекурентних точок, а також на параметри діагональних, вертикальних і горизонтальних ліній.

Міра рекурентності (recurrence rate) характеризує щільність рекурентних точок у діаграмі:

$$RR = \frac{1}{N^2} \sum_{i,j=1}^N RR_{i,j} \quad (3.12)$$

Наступна міра ґрунтується на довжині діагональних ліній l , а саме:

$$P(l) = \sum_{i,j=1}^N (1 - R_{i-1,j-1})(1 - R_{i+1,j+1}) \prod_{k=0}^{l-1} R_{i+k,j+k} \quad (3.13)$$

Відношення кількості рекурентних точок, що входять до складу діагональних ліній (з мінімальною довжиною), до загальної кількості рекурентних точок називається **мірою детермінізму (determinism)** або показником передбачуваності системи:

$$DET = \frac{\sum_{l=l_{\min}}^N l P(l)}{\sum_{l=1}^N l P(l)} \quad (3.14)$$

Довжина діагональної лінії показує період, протягом якого різні фрагменти траєкторії наближаються один до одного у різні моменти часу.

Середня довжина діагоналі характеризує середній часовий інтервал, протягом якого два сегменти траєкторії залишаються близькими, і може інтерпретуватися як середній передбачуваний час.

$$L = \frac{\sum_{l=l_{\min}}^N lP(l)}{\sum_{l=l_{\min}}^N P(l)} \quad (3.15)$$

Також до кількісних мір рекурентних діаграм належать максимальна довжина діагональних ліній та дивергенція (divergence):

$$L_{\max} = \max \{l_i\}_{i=1}^{N_l}, DIV = \frac{1}{L_{\max}} \quad (3.16)$$

де N_l – це загальна кількість діагоналей.

Чим швидше розходяться сегменти траєкторії, тим коротша діагональ і вище показник DIV . Значення максимальної довжини інверсії діагоналі також можна інтерпретувати як величину, безпосередньо пов'язану з максимальним позитивним показником Ляпунова, якщо він існує для даної системи [68].

Міра ентропії (entropy) вказує на складність рекурентної діаграми відносно діагональних ліній. Якщо ENTR приймає досить мале значення, то це свідчить про його низьку складність.

$$ENTR = - \sum_{l=l_{\min}}^N p(l) \ln p(l) \quad (3.17)$$

Наступний показник був визначений як співвідношення між DET та RR:

$$RATIO = N^2 \frac{\sum_{l=l_{\min}}^N lP(l)}{\left(\sum_{l=l_{\min}}^N lP(l)\right)^2} \quad (3.18)$$

Це співвідношення можна застосовувати для виявлення фазових переходів у ситуаціях, коли значення RR зменшується, а міра DET залишається незмінною.

Наступним кроком ми проаналізуємо міру, яка ґрунтується на вертикальних лініях довжини ν , а саме:

$$P(\nu) = \sum_{i,j=1}^N (1 - R_{i,j})(1 - R_{i,j+\nu}) \prod_{k=0}^{\nu-1} R_{i,j+k} \quad (3.19)$$

Міра завмирання (laminarity) визначається як відношення кількості рекурентних точок, які формують вертикальні лінії (мінімальної довжини ν_{\min}), до загальної кількості рекурентних точок:

$$LAM = \frac{\sum_{\nu=\nu_{\min}}^N \nu P(\nu)}{\sum_{l=l_{\min}}^N \nu P(\nu)} \quad (3.20)$$

Ця величина описує наявність станів завмирання в системі, тобто ситуацій, коли рух системи по фазовій траєкторії зупиняється або відбувається дуже повільно.

Середня довжина вертикальних ліній, відома як міра часу затримки (trapping time), показує середній час, протягом якого система залишатиметься в певному стані, або як довго цей стан залишатиметься незмінним.

$$TT = \frac{\sum_{\nu=\nu_{\min}}^N \nu P(\nu)}{\sum_{l=l_{\min}}^N P(\nu)} \quad (3.21)$$

3.2.3 Застосування рекурентних діаграм для аналізу процесів енергоспоживання

Дослідження енергоспоживання здійснювалося на основі спостережень за складною динамічною системою, що аналізує погодинне споживання електроенергії на підприємстві «ДНПРОСПЕЦСТАЛЬ» [85, 86] (рис. 3.12). Вхідні дані – це часові ряди погодинного енергоспоживання протягом 2018 - 2021рр.

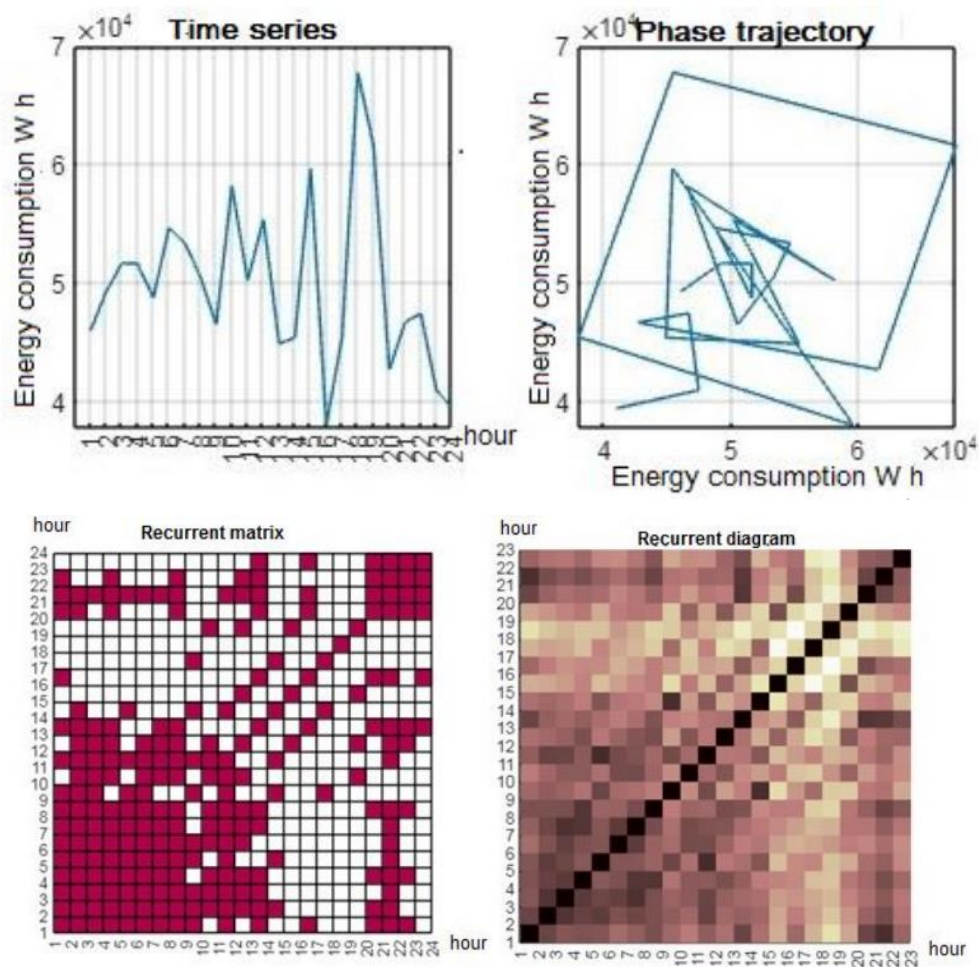


Рисунок 3.12 – Рекурентна діаграма побудована за даними зимового періоду 2021 року

Після аналізу часових рядів можна зазначити, що в основі рекурентних діаграм лежить геометрична структура, яка є зручною для візуальної оцінки отриманих результатів. Топологія рекурентної діаграми з рисунків 3.12 та 3.13

дозволяє виокремити контрастні області, що свідчить про наявність різких змін у динаміці системи.

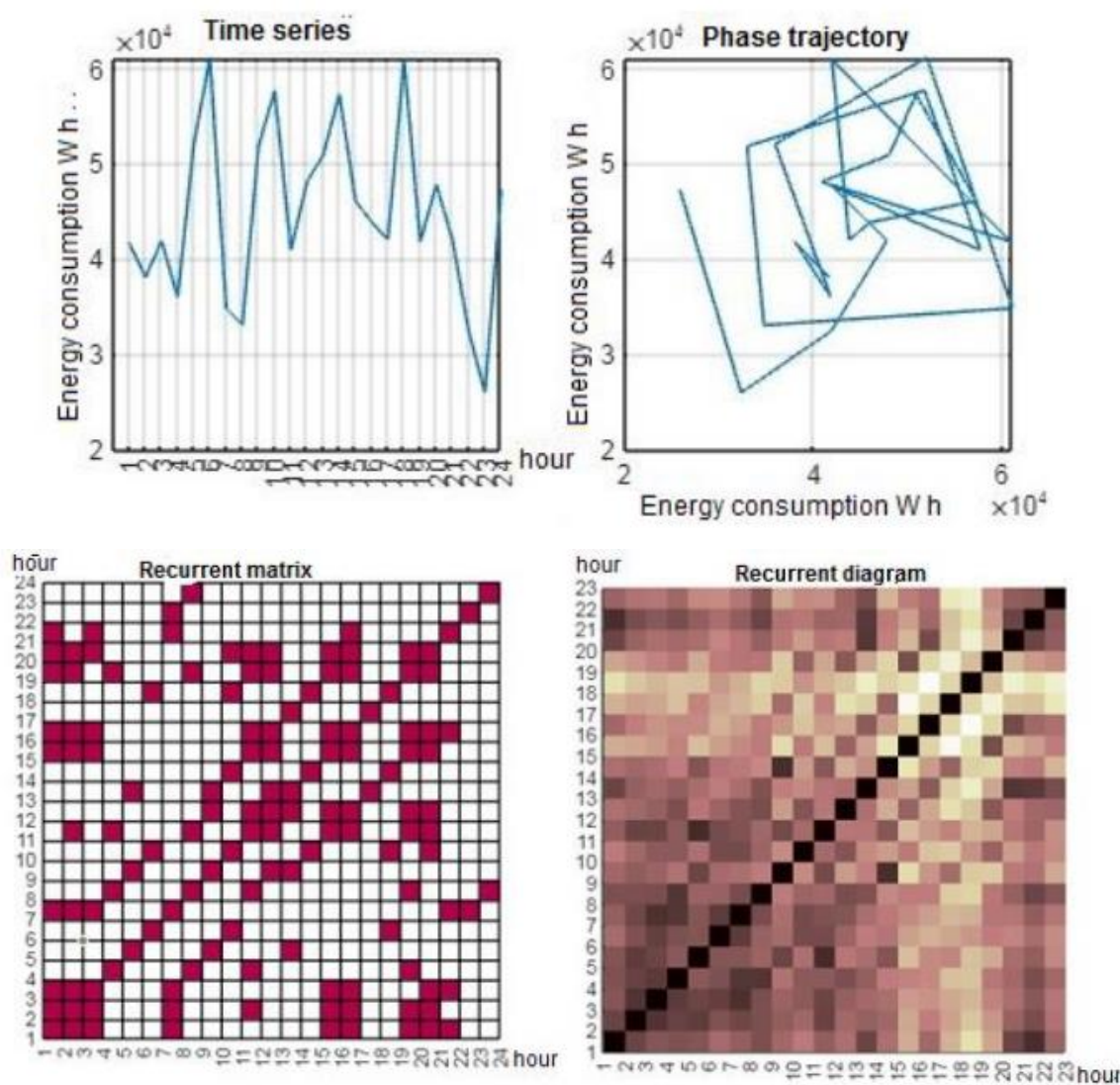


Рисунок 3.13 – Рекурентна діаграма побудована в Matlab за даними літнього періоду 2021 року

Завдяки створеному програмному забезпеченню був проаналізований процес енергоспоживання на металургійному підприємстві та оцінена динаміка в кількісних показниках (таблиця 3.3).

Таблиця 3.3 – Показники кількісного аналізу рекурентних діаграм

	RR	DET	L	DIV	ENTR	RATIO	LAM	TT
зимовий період								
2018	0,3791	0,7728	3,2907	0,1452	10,0034	4,4158	0,7141	3,2484
2019	0,4118	0,8211	3,2966	0,1467	11,898	3,7866	0,7455	3,4923
2020	0,3675	0,9543	7,6927	0,0434	23,9239	3,0806	0,9351	10,0549
2021	0,4386	0,8109	3,2660	0,1462	12,7020	3,7324	0,7369	3,4523
літній період								
2018	0,2959	0,7872	2,2999	0,1627	8,9675	5,5494	0,6606	3,1756
2019	0,3598	0,9548	7,9089	0,0435	23,1336	3,1477	0,9206	10,3593
2020	0,3770	0,9669	7,9860	0,0435	23,0838	3,013	0,9077	9,9727
2021	0,3491	0,9474	8,2313	0,0435	21,1106	3,2213	0,8812	10,5858

Як було зазначено раніше, у рекурентному аналізі важливою характеристикою, що визначає детерміновані процеси, є наявність ліній, які паралельні головній діагоналі. Чим більше точок розташовано на цих діагональних лініях, тим значніша буде детермінована складова ряду [87 - 90].

Кількісні показники DET (3.14), DIV (3.16) та $ENTR$ (3.17) ґрунтуються саме на цьому принципі. Середня довжина діагональних ліній L , представлена формулою (3.15), також є важливим показником, оскільки враховує довжину різних ліній, тоді як показник DET (3.14) підраховує всі точки на паралельних прямих, не зважаючи на їхню довжину. Для абсолютно випадкових процесів значення DET (3.14) буде дуже малим (практично нульовим), тоді як процеси з певною детермінованою складовою матимуть значення цієї міри, що значно перевищують нуль (близькі до одиниці). Аналогічно, чим більше значення L (3.15), тим вища ймовірність того, що процес є детермінованим. Отже, за таблицею 3.3 можна стверджувати, що процес мітить детерміновану складову.

На основі отриманих результатів можна також проаналізувати динаміку кількісних показників системи в часі, оскільки зміни розрахованих мір складності слугують індикатором стану системи. Графіки, представлені на рисунках 3.14 та 3.15, ілюструють динаміку кількісних мір за днями місяця.

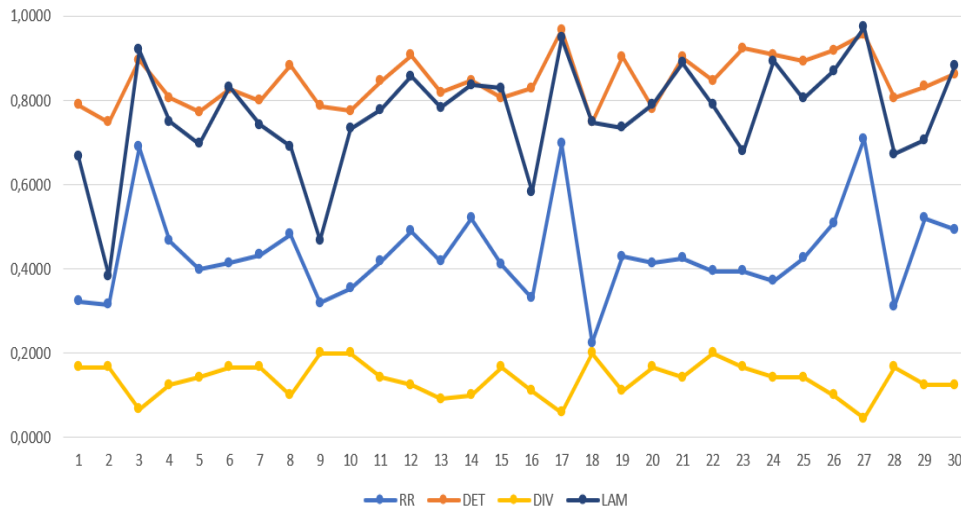


Рисунок 3.14 – Динаміка зміни мір RR, DET, DIV та LAM за вересень 2019 р

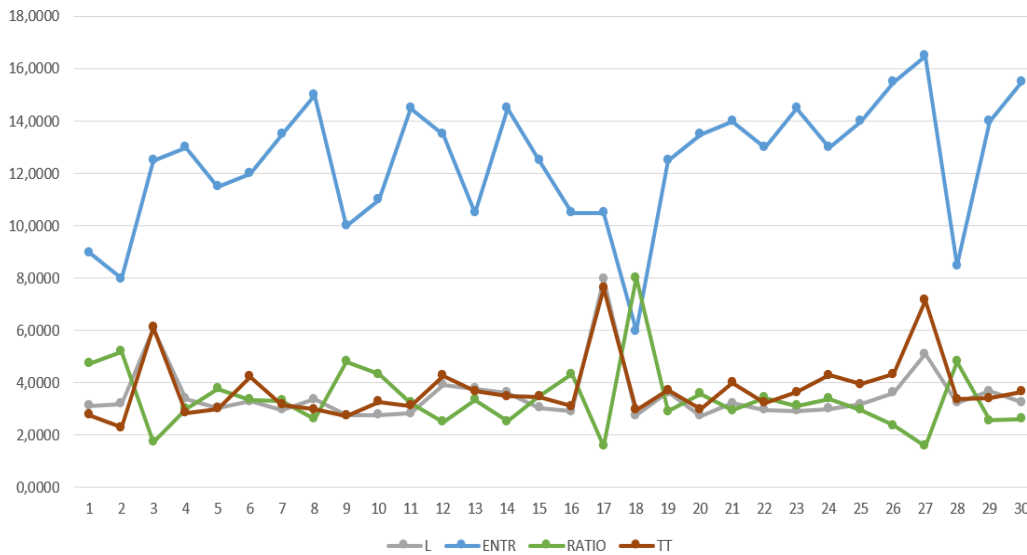


Рисунок 3.15 – Динаміка змін L, ENTR, RATIO та TT за вересень 2019 р

Представлені графіки демонструють, що розраховані для набору рекурентних діаграм дані показники є досить стабільними. Це підтверджує тезу про існування в системі детермінованої складової, яка визначається технологічними особливостями виробничих процесів підприємства.

Отримані дані можуть бути використані для оцінки стану системи. Аналізуючи середні значення кількісних мір за 2018-2021 рр. можна зазначити, що процеси енергоспоживання, які були досліджені не є чисто випадковими процесами, на це вказує кількісний показник DET (3.14) (приймає значення близьке

до одиниці). Крім того, чим вищим є значення L (3.15), тим вища ймовірність того, що процес є детермінованим.

Середні значення міри ентропії (ENTR) (3.17) також виявляються досить високими, що вказує на складність отриманих рекурентних діаграм у порівнянні з діагональними лініями. Таким чином, можна стверджувати, що досліджувані ряди містять певну детерміновану складову, яка зумовлена технологічними особливостями виробничих процесів підприємства. Детерміністичні процеси формують довгі діагоналі та обмежену кількість окремих рекурентних точок. Середня довжина діагональних ліній, що характеризує час передбачуваності динамічної системи, становить 5,4. Середня довжина вертикальних ліній, яка відображає тривалість перебування системи в певному стані, дорівнює 3,8.

Середнє значення міри завмирання (LAM) (3.20) також є досить високим, що вказує на наявність станів завмирання системи, тобто ситуацій, коли рух системи по фазовій траєкторії зупиняється або відбувається дуже повільно. Міра рекурентності (RR) (3.12) в середньому становить близько 0,35. Це означає, що ймовірність повторення певного стану процесу споживання електроенергії протягом місяця дорівнює 35%.

Аналіз середніх значень кількісних показників для періодів зима та літо свідчить про те, що літній час відзначається більшою передбачуваністю та значно вищим рівнем затримки, що вказує на середній період, протягом якого система може функціонувати в більш-менш стабільному стані. Використання методології рекурентного аналізу для часових рядів споживання електроенергії в майбутньому може забезпечити позитивний економічний ефект завдяки детальному аналізу кількісних показників та станів системи металургійного підприємства.

3.3 Аналіз впливу випадкового шуму на рекурентні діаграми

Для вивчення впливу шуму (інформаційного шуму) на рекурентні діаграми часових рядів ми застосуємо логістичне відображення (3.22). Це відображення

часто використовується як приклад того, як з простих нелінійних рівнянь може виникати складна і хаотична поведінка.

$$x_{t+1} = rx_t(1 - x_t) \quad (3.22)$$

де величина x_t варіює від 0 до 1;

r – параметр, що визначає швидкість зростання шуму, який може набувати значень від 0 до 4.

Встановлюючи різні значення цього параметра в рівнянні (3.22), можна отримати різні типи поведінки змінної. Іншими словами, при зміні параметрів моделі характер динаміки часового ряду змінюється, переходячи від стаціонарних рядів до регулярних, а потім до хаотичних коливань.

Для отримання зашумлених рядів до часового ряду, який був отриманий за формулою (3.22), ми будемо додавати випадкові значення, згенеровані за допомогою генератора випадкових чисел [92 - 93]:

$$x_{t+1} \rightarrow x_{t+1} + aR_{rand} \quad (3.23)$$

де R_{rand} – це випадкове число в межах від 0 до 1; a – коефіцієнт, що відображає рівень шуму у відсотках.

Довільно вибрана рекурентна точка не містить корисної інформації про стани в час i та j , лише вся сукупність рекурентних точок дає змогу відновити властивості системи.

У разі визначення околу в формі кулі фіксованого радіуса рекурентні діаграми демонструватимуть симетричні структури відносно головної діагоналі, оскільки, якщо x_i близьке до x_j , то правильне і протилежне: x_j близьке до x_i . Однак картина ускладниться, якщо не накладається умова на рівність радіусів i -го та j -го околів. Це можна математично пояснити у такий спосіб [92]. У разі визначення околу в формі кулі з таким радіусом, що він охоплює строго фіксовану кількість

станів x_j , вибирається ε_i для кожного x_j ($i=1,\dots,N$) окремо $R_{i,j} \neq R_{j,i}$, оскільки окіл, визначений для x_i не обов'язково збігається з околom для x_i . Це призводить до асиметрії в рекурентних діаграмах, однак всі стовпчики масиву мають однакове значення щільності рекурентності. Використовуючи критерій ε_i , можна легко визначити цю щільність, вибравши $\varepsilon = 15$. Локально визначений радіус ε_i вводиться так, що відповідний окіл охоплює 15 % усіх векторів фазового простору.

Таким чином, щільність рекурентності становить 0,15. Цей підхід відомий як фіксована кількість найближчих точок (fixed amount of nearest neighbors - FAN), що означає, що він базується на фіксованій кількості векторів фазового простору, які потрапляють у вибраний окіл. Отже, існують два підходи до визначення околу [93]:

$$\varepsilon_i = \varepsilon, \forall_i, R_{i,j} \neq R_{j,i};$$

$$\varepsilon_i = \varepsilon, \forall_i, R_{i,j} = R_{j,i}.$$

Слід звернути увагу на **вибір значення порогової величини ε** . Звісно, бажано обрати найменше можливе значення. Проте на практиці, враховуючи наявність шуму, часто доводиться підвищувати порогову величину. Якщо $\varepsilon_i \neq \varepsilon$ для всіх i , рекомендується встановлювати порогове значення, яке не перевищує 10 % від максимального діаметра фазового простору - σ . У випадку, коли $\varepsilon_i \neq \varepsilon$, порогове значення розраховується на основі щільності рекурентності. При використанні нестационарних даних величина ε може знижуватися до 1 %.

В якості норми часто використовується також максимум модулів різниць між відповідними координатами:

$$\|\vec{a} - \vec{b}\| = \max\{|a_i - b_i|\}, i = 1, \dots, m \quad (3.24)$$

З врахуванням сталого радіуса ε_i та норми (3.24) матриця \mathbf{R} отримується симетричною, а бінарні значення у \mathbf{R} досить просто візуалізувати у вигляді відображення на площині точок з координатами, що відповідають рядкам i

стовпчикам у R , та зображеними чорним кольором при $R_{ij} = 1$ і білим кольором при $R_{ij} = 0$.

На рисунку 3.16 побудовано рекурентні діаграми на основі даних про погодинне енергоспоживання металургійного підприємства ПрАТ «ДНПРОСПЕЦСТАЛЬ». На зазначеному рисунку рекурентні діаграми для звичайних процесів (рис. 3.18, *a*) відповідно та для хаотичного «випадково вибраного процесу» при $r=3,6$ (рис. 3.18, *b*). Довжина часового ряду становить 50. Усі діаграми мають мінімальне значення $\varepsilon=0,05$.

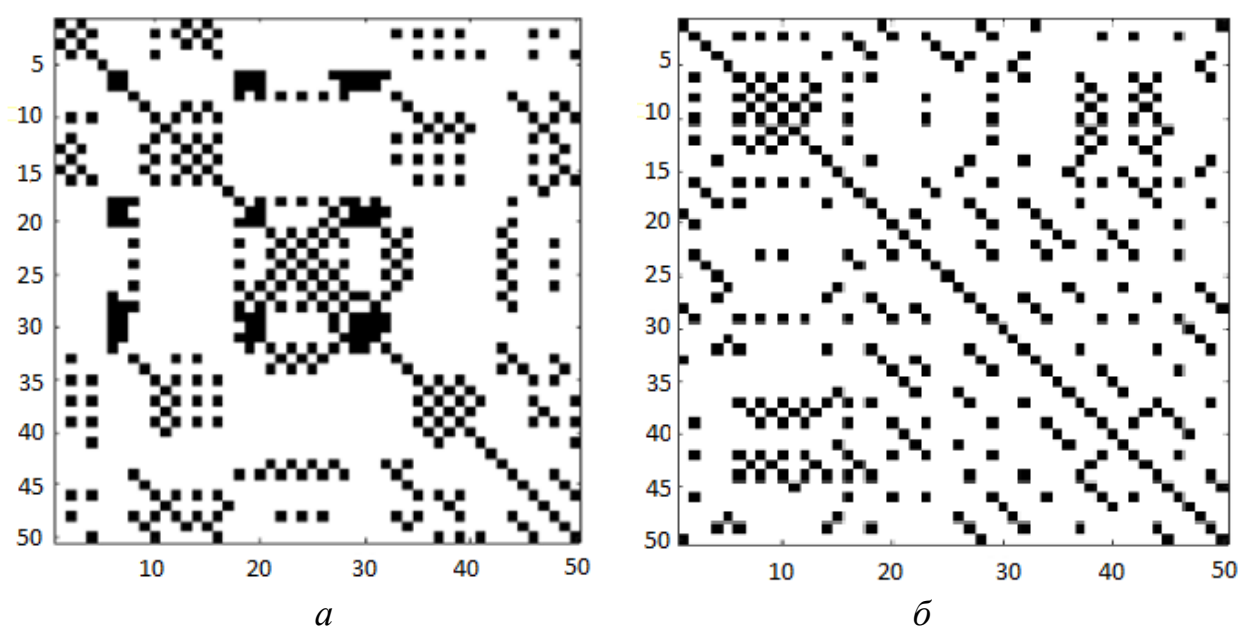
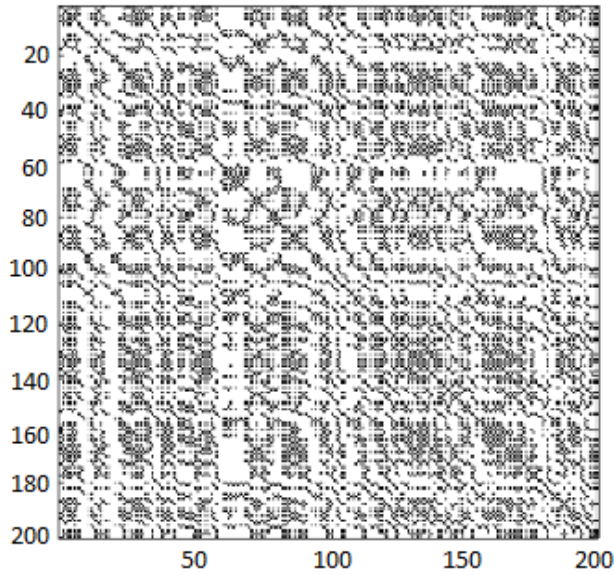
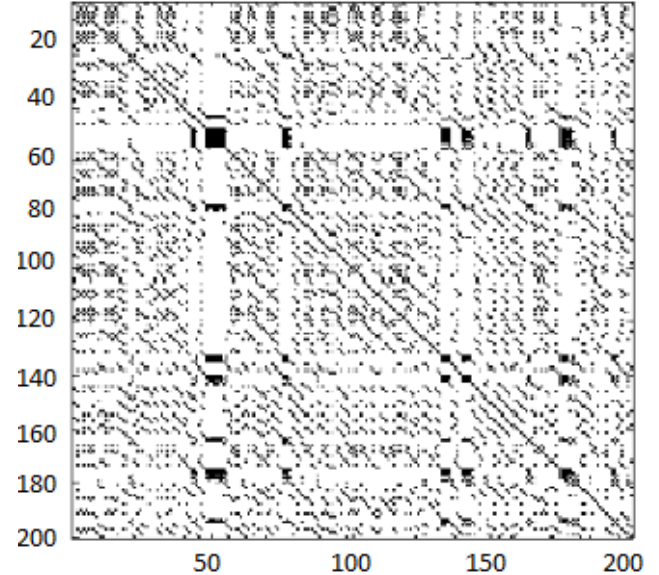
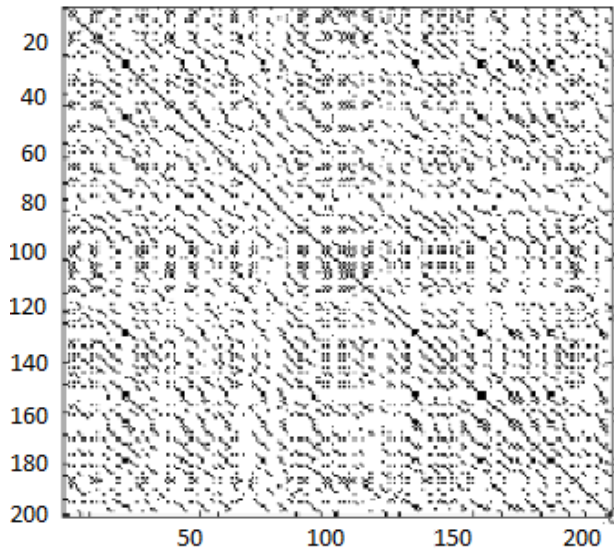
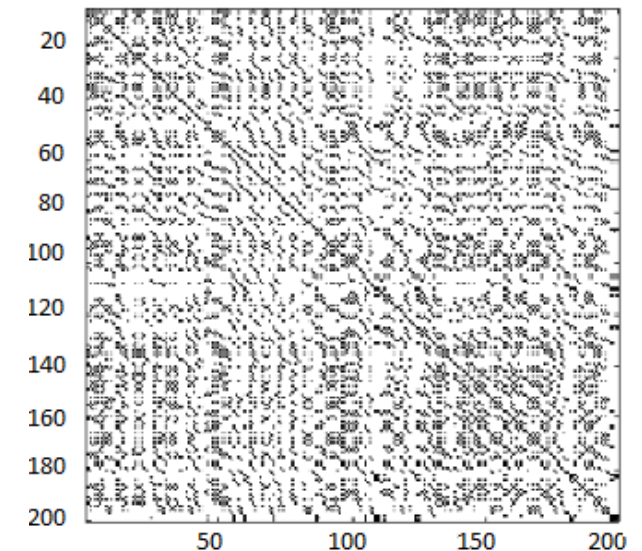


Рисунок 3.16 – Зображення рекурентних діаграм: *a* – для звичайних процесів; *б* – для хаотичного «випадково вибраного процесу» при $r=3,6$

Немає конкретних критеріїв для вибору параметрів під час створення рекурентних діаграм, але важливо використовувати однакові або подібні параметри щоразу під час аналізу та порівняння властивостей часових рядів. У дослідженні впливу шуму на енергоспоживання використано часовий ряд довжиною 200 спостережень і графіки повторюваності зі значенням $\varepsilon=0,05$. Параметр r дорівнює 3,25 і 3,55 (регулярний, нормальний, хаотичний) або 3,6 (хаос, динамічний).

На рисунку 3.17 представлені діаграми, що ілюструють вплив рівня шуму на рекурентні властивості часових рядів, на рекурентні діаграми для зашумлених регулярних часових рядів, а також для зашумленого хаотичного часового ряду. Рівень шуму в даному випадку дорівнює 10 % (рис. 3.17, *a–в*) та 15 % (рис. 3.17, *г–е*).

*a**б**в**г*

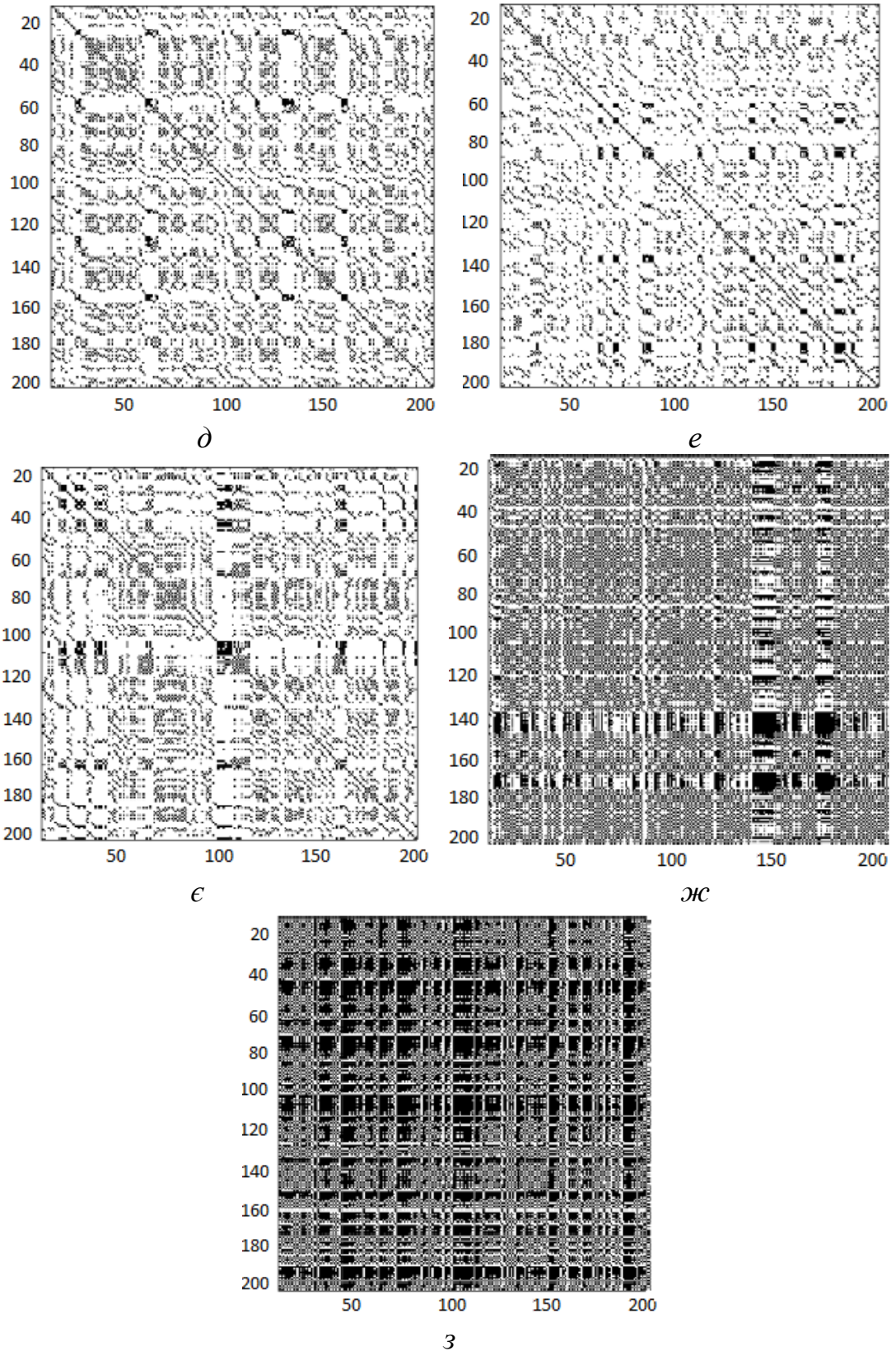


Рисунок 3.17 – Рекурентні діаграми для зашумлених часових рядів при $r=3,25$ (*a*, *г*, *е*) і при $r=3,55$ (*б*, *д*, *ж*), а також для зашумленого хаотичного ряду при $r=3,6$ (*в*, *е*, *з*): *a*–*в* – рівень шуму становить 10 %; *г*–*е* – рівень шуму становить 15 %; *ε* – $\epsilon=30$; *ж* – $\epsilon=40$; *з* – $\epsilon=50$

Помітно, що підвищення рівня шуму може спричинити зближення рекурентних характеристик регулярних і хаотичних процесів, що проявляється у подібності розподілу точок на відповідних рекурентних діаграмах.

При виборі значень порогового параметра було обрано найменше з можливих значень. В умовах наявності шумової компоненти незначно збільшено порогову величину. У випадку, коли $\epsilon_i \neq \epsilon$, $\forall i$, обрано порогове значення, не більше за 10 % від значення максимального діаметра фазового простору – σ , якщо $\epsilon_i \neq \epsilon$, то порогове значення розраховують щодо щільності рекурентності.

На діаграмах білі смуги свідчать про те, що деякі стани є винятковими або далекі від нормального, можливо, відбулись переходи. Оскільки в структурі діаграми з'явилися характерні виражені білі зони, то це відображає різкі зміни динаміки процесу, нестационарність. Значення ϵ змінимо на $\epsilon=30$, $\epsilon=40$ і $\epsilon=50$ (рис. 3.10., *ε–ж*) (гранична відстань або відстань від центра вибраного околу до границі). Можна спостерігати таку закономірність: що більше значення ϵ , то більше з'являється хаотичних точок навколо діагональної лінії. Це свідчить про сильні флуктуації в процесі. Для зменшення шумів доцільніше вибирати якомога менше значення ϵ , однак це не завжди можливо щодо певних часових рядів. У кінцевому результаті рекурентні діаграми кардинальних змін не зазнали.

Для дослідження було взято дані енергоспоживання за зимовий та літній періоди 2018–2021 рр. [92-93]. Розраховані кількісні показники представлено у вигляді табл. 3.4, 3.5.

Присутність прямої, що паралельна головній діагоналі, є важливою характеристикою, яка визначає детерміновані процеси. Чим більше точок розташовано на діагональних лініях, тим вищою буде детермінована складова ряду. Кількісні показники *DET*, *DIV* та *ENTR* (3.17) ґрунтуються саме на цьому принципі. Середня довжина діагональних ліній *L* (3.15) також є важливим показником, оскільки враховує довжину різних ліній – як можна бачити з розрахованих показників *RQA* (3.18) при урахуванні впливу шуму значення *L* зменшується, і процес стає більш схожим на хаотичний. Показник *DET* обчислює всі точки на паралельних прямих, не зважаючи на їхню довжину.

Для випадкових процесів значення DET (3.14) є дуже малим (практично нульовим), тоді як для процесів з певною детермінованою складовою це значення буде значно більшим за нуль (близьким до одиниці). Зниження показника DET пов'язане з підвищенням рівня шуму. Середнє значення міри ентропії також виявилось високим, що свідчить про складність отриманих рекурентних діаграм у порівнянні з діагональними лініями. Таким чином, досліджувані ряди містять певну детерміновану складову, а з урахуванням впливу шуму це значення різко знижується [94-96].

Таблиця 3.4 – Показники RQA при дослідженні впливу рівня шуму на рекурентні діаграми за зимовий період

Рівень шуму	RR	DET	L	DIV	$ENTR$	$RATIO$	LAM	TT
Зима 2018								
0	0.4253	0.8756	3.9545	0.1111	10.9872	3.0402	0.8667	4.4318
3,25	0.4253	0.8578	3.8636	0.1111	10.9872	3.1118	0.8756	4.1915
3,55	0.4178	0.8643	3.8182	0.1429	10.9872	3.1488	0.8597	4.2222
3,6	0.4216	0.8475	3.7727	0.1429	10.9872	3.1867	0.8700	4.0417
Зима 2019								
0	0.2401	0.8425	2.8000	0.1667	7.4823	6.2976	0.6614	3.5000
3,25	0.2439	0.8450	2.8667	0.1667	7.4823	6.1512	0.6667	3.7391
3,55	0.2325	0.8374	2.8571	0.1667	6.9812	6.6125	0.6667	3.5652
3,6	0.2363	0.8400	2.7333	0.1667	7.4823	6.4512	0.6720	3.5000
Зима 2020								
0	0.3497	0.7622	2.6818	0.2000	10.9872	4.4831	0.7514	2.9574
3,25	0.3459	0.7377	2.6667	0.2000	10.4867	4.7232	0.7377	3
3,55	0.3497	0.7622	2.6818	0.2000	10.9872	4.4831	0.7297	2.9348
3,6	0.3497	0.7622	2.6818	0.2000	10.9872	4.4831	0.7405	2.8542
Зима 2021								
0	0.8715	0.9870	6.5455	0.0625	16.4909	1.2245	0.9718	7.4667
3,25	0.8677	0.9869	6.5152	0.0625	16.4909	1.2302	0.9673	7.1613
3,55	0.8677	0.9869	6.5152	0.0625	16.4909	1.2302	0.9695	7.2951
3,6	0.8677	0.9869	6.5152	0.0625	16.4909	1.2302	0.9695	7.2951

Міра рекурентності RR (3.12) у дослідженнях без урахування шуму становить приблизно 0,62. Це означає, що ймовірність повторення певного стану процесу споживання електроенергії протягом дня дорівнює 62%. Під впливом шуму цей показник знижується.

Середнє значення міри завмирання LAM (3.20) також зменшується в умовах шуму. Цей показник відображає наявність станів завмирання системи, тобто ситуацій, коли рух системи по фазовій траєкторії зупиняється або відбувається дуже повільно.

Середня довжина вертикальних ліній, що показує час, протягом якого система залишається в певному стані, дорівнює 3,5 без шуму та 2 під впливом шуму.

Оскільки динаміка розрахованих показників складності є індикаторами зміни стану системи, отримані результати також можуть бути використані для оцінки динаміки кількісних показників системи в часі.

Таблиця 3.5 – Показники RQA при дослідженні впливу рівня шуму на рекурентні діаграми за літній період

Рівень шуму	<i>RR</i>	<i>DET</i>	<i>L</i>	<i>DIV</i>	<i>ENTR</i>	<i>RATIO</i>	<i>LAM</i>	<i>TT</i>
Літо 2018								
0	0.4253	0.8400	2.9643	0.1429	13.9896	3.1867	0.7556	3.4694
3,25	0.4291	0.8414	3.0000	0.1250	13.9896	3.1488	0.7621	3.4600
3,55	0.4216	0.8296	3.0000	0.1429	13.4892	3.2654	0.7489	3.4792
3,6	0.4216	0.8296	2.8929	0.1429	13.9896	3.2654	0.7534	3.4286
Літо 2019								
0	0.4707	0.8313	3.1724	0.1667	14.4899	2.8750	0.8233	3.4167
3,25	0.4707	0.8313	3.1724	0.1667	14.4899	2.8750	0.8233	3.4167
3,55	0.4707	0.8313	3.1724	0.1667	14.4899	2.8750	0.8233	3.4167
3,6	0.4745	0.8406	3.1333	0.1667	14.9902	2.8138	0.8207	3.4333
Літо 2020								
0	0.6030	0.9436	3.9714	0.0588	17.4914	1.9029	0.9498	5.5091
3,25	0.5992	0.9432	3.8333	0.0714	17.9916	1.9167	0.9495	5.3750
3,55	0.6068	0.9439	4.0000	0.0588	17.4914	1.8893	0.9564	5.4821
3,6	0.6068	0.9441	4.2123	0.0588	17.4910	1.7893	0.5364	5.5843
Літо 2021								
0	0.4972	0.8403	3.3000	0.1250	14.9902	2.6717	0.7605	2.8571
3,25	0.4972	0.8403	3.3000	0.1250	14.9902	2.6717	0.7605	2.8571
3,55	0.4934	0.8391	3.2667	0.1250	14.9902	2.6990	0.7548	2.8551
3,6	0.4896	0.8301	3.3103	0.1250	14.4899	2.7552	0.7490	2.8529

3.4 Висновки за розділом 3

Експериментально досліджені методи добового прогнозування в пакеті Matlab та середовищі Python, проведено порівняння декількох архітектур нейронних мереж та обрано дві найкращих, які дають найбільшу точність прогнозування енергоспоживання на добу вперед – модель нелінійної авторегресії з зовнішніми входами з алгоритмом навчання Levenberg-Marquardt та мережа LSTM.

Експериментально досліджено вплив температури та хмарності на енергоспоживання металургійного підприємства за допомогою економетричного пакету Gretl. У межах проведеного дослідження було проаналізовано зимовий і літній періоди протягом чотирьох років. Встановлено, що в обох сезонах зв'язок між хмарністю та енергоспоживанням є слабким. Водночас у зимові періоди залежність між температурою та енергоспоживанням виявилася вищою, ніж у літні місяці.

Також досліджено застосування методу рекурентного аналізу до процесів енергоспоживання на металургійних підприємствах. Застосовано методологію побудови рекурентних діаграм та їх кількісного аналізу для аналізу станів поведінки системи.

Результати розділу 3 опубліковані в роботах автора : [81], [85], [86], [97], [102].

4 СИСТЕМА МОНІТОРИНГУ РИЗИКІВ ЯК ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ АНАЛІЗУ І ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ МЕТАЛУРГІЙНОГО ПІДПРИЄМСТВА

У попередніх розділах запропоновано методи, які дозволяють реалізувати задачі енергозбереження на металургійних підприємствах. Метою цього розділу є побудова моделі системи моніторингу еколого-економічних ризиків на металургійному підприємстві.

4.1. Інфологічна модель системи моніторингу для ідентифікації та управління еколого-економічними ризиками металургійного підприємства

Під структурою інформаційної системи моніторингу ми розуміємо **спосіб** налагодження взаємодії інформаційних джерел металургійного підприємства як об'єкта моніторингу з базою даних і блоками обробки та аналізу даних, а також кінцевими споживачами інформації: керівництвом і працівниками підприємства, громадянським суспільством. Така організація системи моніторингу забезпечує постійний контроль ризиків і прозорість інформаційних систем.

Відповідні дані збираються (екологічні показники, дані про споживання енергоресурсів та ринкові ціни тощо) і подаються на вхід інформаційної системи, де вони обробляються, проводиться аналіз даних та оцінка ризиків, прогнозування, і за результатами обробки приймаються рішення щодо мінімізації ризиків під час реалізації проєктів з енергозбереження (рисунок 4.1).

На виході інформаційної системи моніторингу маємо показники, розраховані в блоці аналізу даних: організаційні, технологічні, економічні показники ефективності проєктів енергозбереження, показники паливно-енергетичного балансу, оцінки економічних та екологічних ризиків.



Рисунок 4.1 – Вхідні дані для системи моніторингу ризиків енергозбереження

Забруднення довкілля є предметом особливої уваги, екологічні ризики залежать від рівня використання електроенергії металургійними підприємствами, чим вищий рівень енергоспоживання тим більший рівень забруднення екології.

Під екологічними ризиками ми розуміємо відхилення (абсолютне та відносне) обсягів викидів шкідливих речовин від граничних норм таких викидів.

Це ймовірність отримання певного збитку в результаті прояву чинника екологічної небезпеки стосовно людини, навколишнього середовища і підприємства в цілому [95]. Даний показник визначається відхиленням об'єму викидів від нормативів. Управління екологічними ризиками, має на меті підвищення їхньої прогнозованості та зниження вірогідності їхнього прояву.

Металургійні підприємства негативно впливають на навколишнє середовище, забруднюючи атмосферу, стічні води та ґрунт, що призводить до перевищення гранично допустимих концентрацій небезпечних речовин. Екологічні ризики можуть спричинити втрату ресурсів і зниження економічної ефективності підприємств, що, у свою чергу, веде до скорочення обсягів збуту та ускладнення виконання фінансових зобов'язань. Це створює нові ризики збитків як для зовнішнього соціально-економічного середовища, так і для довкілля. У зв'язку з

цим виникає необхідність впровадження системи управління ризиками в загальну еколого-економічну систему металургійного підприємства.

Контроль за викидами в атмосферу здійснюється за допомогою документу Сумарні потенційні обсяги викидів забруднюючих речовин та груп речовин в атмосферне повітря від підприємства «ДНІПРОСПЕЦСТАЛЬ» за 2021 р.

Моніторинг впливу на навколишнє середовище здійснюється за допомогою замірів на наступних ділянках «ДНІПРОСПЕЦСТАЛЬ», відображених в таблиці 4.1 [95].

Щоденний контроль технічного стану природоохоронних об'єктів проводиться наступним чином – здійснюється перевірка газоочистки, димоходів, газовідводів, прилади на газоочисному апараті і т. інше – весь комплекс обладнання від джерел викидів (сталеплавильні печі) і до труби викидів. Проводиться візуальний контроль, щоб не було руйнування, деформації, корозії, не з'явилися дірки і т.п., які з'являються в процесі експлуатації та потребують ремонту.

Моніторинг і контроль еколого-економічних ризиків передбачає спостереження за ідентифікованими ризиками, аналіз залишкових ризиків, виявлення нових ризиків, реалізацію планів реагування та оцінку їхньої ефективності. У результаті цього процесу створюються оновлені та скориговані плани реагування, коригувальні заходи, вимоги до змін, а також стандартні звіти з управління екологічними ризиками. Контроль сприяє вибору альтернативних стратегій, внесенню необхідних коректив і переплануванню проєкту для забезпечення відповідності базовому плану. На «ДНІПРОСПЕЦСТАЛЬ» були вивчені екологічні та економічні ризики та розроблена інформаційна система моніторингу цих ризиків для металургійного підприємства (рис. 4.2).

Відповідні дані збираються (екологічні показники, дані про енергоспоживання та ринкові ціни і т.п.) та подаються на вхід інформаційної системи, де оброблюються та за результатами обробки приймаються рішення щодо мінімізації ризиків при реалізації проєктів енергозбереження.

Таблиця 4.1 – Моніторинг впливу шкідливих речовин на навколишнє середовище за джерелами забруднення (Джерело: розроблено автором)

Ділянка	Назва показника	Нормативні вимоги	Кількісна оцінка показника (в динаміці за періодами)	Частота спостереження	Метод спостереження	Аналіз ризиків, що можна передбачити
Скважина 1 (балка “Середня”)	рівень та периметр ґрунтових вод	ГДК вмісту шкідливих речовин в ґрунтових водах	в динаміці за періодами	щомісяця	методом забору та лабораторного аналізу відповідності показників забруднення ґрунтових вод шкідливими речовинами нормам ГДК	відхилення від норми, негативна/позитивна динаміка
25-ти метрова смуга екологічної безпеки	перелік шкідливих речовин не має (візуальний контроль)	—	—	щомісяця	візуальний контроль	відхилення від норми, негативна/позитивна динаміка
Кожна труба на заводі (655 штук)	шкідливі речовини, які є в дозволі на викиди	Граничні допустимі норми	їхні обсяги	згідно дозволу на викиди – деякі 1, деякі 2 рази на рік.	інструментальний метод виміру, тобто приладами	відхилення від норми, негативна/позитивна динаміка акт повірки ефективної роботи установки
Весь комплекс обладнання від джерел забруднюючих речовин і до місця викидів	наявність пошкодженого обладнання (деформації, корозії, діри, тощо.)	—	їхні обсяги	за бажанням робітників	візуальний контроль	відхилення від норми, негативна/позитивна динаміка зауваження, рекомендації

Спалювання викопного твердого та рідкого палива супроводжується викидами сірчистого, вуглекислого та чадного газів, а також оксидів нітрогену,

пилу, сажі та інших забруднювальних речовин. У зв'язку з цим виникає необхідність управління **екологічними ризиками**, що спрямоване на підвищення ймовірності успішного досягнення цілей усього процесу ризик-менеджменту. Це передбачає ухвалення рішень щодо вибору основного підходу, планування та реалізації заходів з управління екологічними ризиками на підприємстві (табл. 4.2).

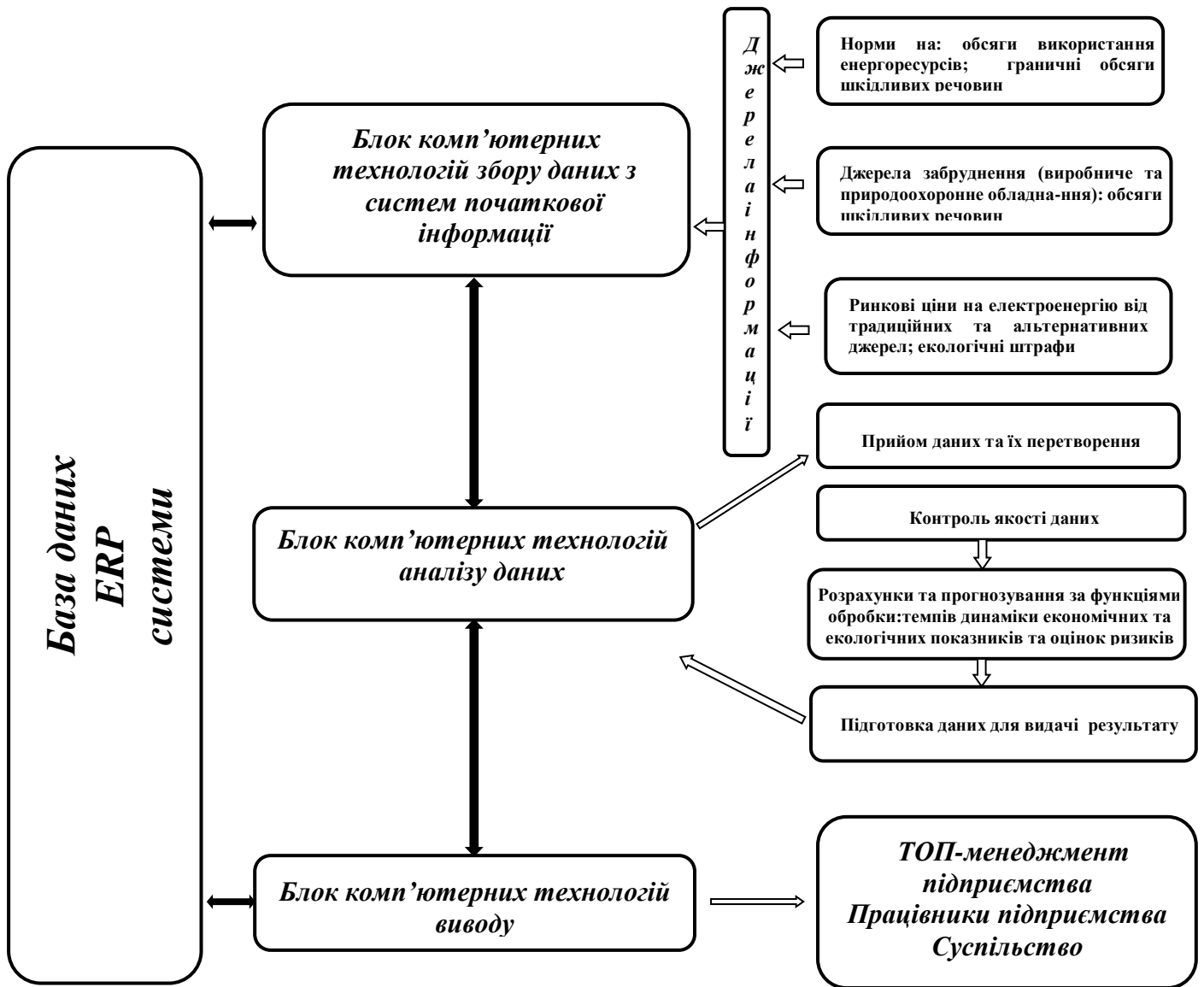


Рисунок 4.2 – Зальна структура інформаційної системи моніторингу

(Джерело: розроблено автором)

Під економічними ризиками розуміємо ризики неточного прогнозування, тобто відхилення абсолютного значення від прогнозованого. В даному дослідженні

запропоновано здійснювати моніторинг щоденного споживання електроенергії за такими показниками: абсолютне значення споживання електроенергії (кВт) та ринкової ціни на електроенергію; прогнозоване значення споживання електроенергії (кВт) та прогнозована ринкова ціна на електроенергію. Екологічні ризики металургійного підприємства представлені в табл. 4.2.

Таблиця 4.2 – Екологічні ризики металургійного підприємства «ДНПРОСПЕЦСТАЛЬ» (Джерело: розроблено автором)

Ділянка	Назва показника	Нормативні вимоги	Кількісна оцінка показника	Частота спостереження	Метод спостереження	Аналіз ризиків, що можна передбачити
Водні ресурси						
Свердловина	рівень та периметр ґрунтових вод	ГДК вмісту шкідливих речовин в ґрунтових водах	в динаміці за періодами	щомісяця	забір та лаб. аналіз відповідності показників в забруднених ґрунтових вод	економіко-екологічні ризики відхилення від норми, негативна/позитивна динаміка
Ґрунт						
25-ти метрова смуга екологічної безпеки	–	–	–	щомісяця	візуальний контроль	економіко-екологічні ризики відхилення від норми, негативна/позитивна динаміка
Повітря						
Труби (655 штук)	шкідливі речовини, які є в дозволі на викиди	гранично-допустимі норми	їхні обсяги	згідно дозволу на викиди – деякі 1, деякі 2 рази на рік.	інструментальний метод виміру	економіко-екологічні ризики відхилення від норми, негативна/позитивна динаміка акт перевірки ефективної роботи установки
Природоохоронні об'єкти						
Комплекс обладнання від джерел забруднюючих речовин і до місця викидів	пошкодження обладнання (деформації, корозії, діри, тощо.)	-	їхні обсяги	щомісяця	візуальний контроль	технологічний ризик недосконалість техніки та порушення правил експлуатації, що може привести до аварій, вибухів і катастроф.

У таблиці 4.3 наведено добові дані щодо аналізу якості вирішення завдань планування споживання електроенергії, як бачимо за цю добу отримано економію.

В даній таблиці економічний ефект розраховується наступним чином:

- колонка 2 – відображається фактична ціна електроенергії, як можна бачити цінова політика розбита по зонам день – ніч;
- колонка 3 - 4 прогнозовані та фактичні значення енергоспоживання;
- колонка 5 - 6 абсолютне та відносне відхилення фактичного значення енергоспоживання від значення прогнозу;
- колонка 7 – 8 абсолютне та відносне значення енергоспоживання в вартісному вираженні;
-

$$C_{відх} = C_{ел} \cdot E_{спож} \quad (4.5)$$

де $C_{відх}$ – вартісне відхилення ціни електроенергії, грн;

$C_{ел}$ – ціна електроенергії, грн;

$E_{спож}$ – значення енергоспоживання фактичне або прогнозоване, грн;

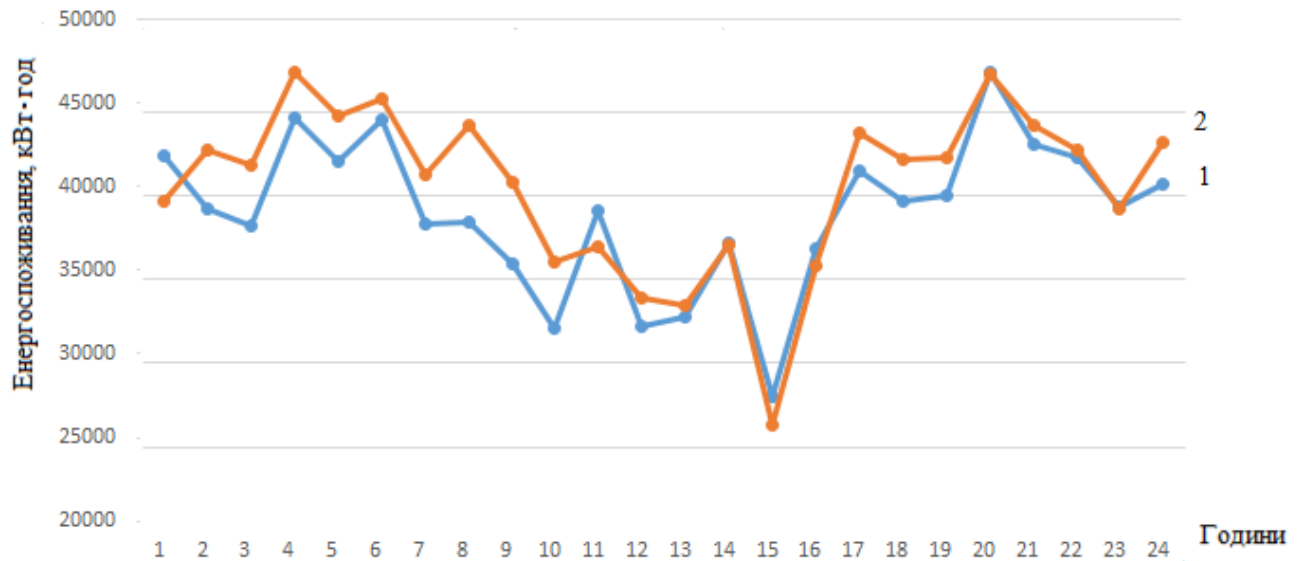
Аналізуючи розбиття цін електроенергії на добові цінові зони можна спостерігати помітний економічний ефект – вночі при використанні 441156 кВт/г отримаємо економію 253476 грн, а вдень економія буде меншою – при використанні 233105 кВт/г економія буде становити лише -116719 грн. Таким чином одним з шляхів підвищення енергозбереження на металургійному підприємстві є удосконалення методики перерозподілення робіт таким чином, щоб в нічний період часу виконувалися найбільш енергоємні операції, що дозволить значно заощадити електроенергію.

Здійснено аналіз фактичного та прогнозованого значення енергоспоживання в літній та зимовий періоди, зроблені розрахунки відхилень прогнозованого значення від фактичного показника та розраховано економічний ефект (табл. А.1 та табл. А.2 – додатків) від проведеного прогнозування енергоспоживання на добу вперед (табл. 4.3).

За даними розрахунків (4.5) можна бачити, що економія за лютий 2021 року –72155,39 грн, а за липень 2021 року склала – 41549,88 грн.

Таблиця 4.3 – Добові дані щодо аналізу якості вирішення завдань планування споживання електроенергії (Джерело: розроблено автором)

Дата	17 вересня 2019 р.							
Година	Факт. ціна оператору ринка на ел.ен. без ПДВ грн./тис.кВт/г	Прогноз, кВт/г	Фактичне споживання кВт/г	Відхилення енергоспоживання, кВт/г		Вартість, грн		
				кВт/г	%	Прогноз, грн	Факт. споживання, грн.	Відхилення, грн
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	959,11	39700	42395	2695	6,79	38076,67	40661,47	2584,80
2	959,11	42800	39226	-3574	8,35	41049,91	37622,05	-3427,86
3	959,11	41800	38165	-3635	8,70	40090,80	36604,43	-3486,36
4	959,11	45400	44712	-688	1,52	43543,59	42883,73	-659,87
5	959,11	44750	42042	-2708	6,05	42920,17	40322,9	-2597,27
6	959,11	45850	44529	-1321	2,88	43975,19	42708,21	-1266,98
7	959,11	41250	38340	-2910	7,05	39563,29	36772,28	-2791,01
8	1 536,17	41200	38480	-2720	6,60	63290,20	59111,82	-4178,38
9	1 536,17	40862	38999	-1863	4,56	62770,98	59909,09	-2861,88
10	1 536,17	36100	32141	-3959	10,97	55455,74	49374,04	-6081,70
11	1 536,17	37000	39152	2152	5,82	56838,29	60144,13	3305,84
12	1 536,00	35900	36217	317	0,88	55142,40	55629,31	486,91
13	1 536,00	33400	34828	1428	4,28	51302,40	53495,81	2193,41
14	1 536,17	37100	37159	59	0,16	56991,91	57082,54	90,63
15	1 536,17	26300	28023	1723	6,55	40401,27	43048,09	2646,82
16	1 536,17	35800	36909	1109	3,10	54994,89	56698,5	1703,61
17	1 536,17	43800	41455	-2345	5,35	67284,25	63681,93	-3602,32
18	1 536,17	42150	39672	-2478	5,88	64749,57	60942,94	-3806,63
19	1 536,17	42350	39987	-2363	5,58	65056,80	61426,83	-3629,97
20	1 536,17	47250	47384	134	0,28	72584,03	72789,88	205,85
21	1 536,17	44250	43081	-1169	2,64	67975,52	66179,74	-1795,78
22	1 536,17	42750	44296	1546	3,62	65671,27	68046,19	2374,92
23	1 536,17	39250	39373	123	0,31	60294,67	60483,62	188,95
24	959,11	43250	45696	2446	5,66	41481,51	43827,49	2345,98
Усього		970262	952261	-18001	113,57	1291505,3	1269447	-22058,30



Години	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Факт	4239	3923	3817	4471	4204	4453	3834	3848	3899	3214	3915	3622	3282	3716	2802	3691	4146	3967	3998	4734	4308	4429	3973	4569
Прогноз	3970	4280	4180	4540	4475	4585	4125	4420	4086	3610	3700	3590	3340	3710	2630	3580	4380	4215	4235	4725	4425	4275	3925	4325

Рисунок 4.3 – Добовий прогноз та споживання електроенергії ПрАТ «ДНІПРОСПЕЦСТАЛЬ» за 17.09.2019 р
1 – факт; 2 – прогноз

Прогнозування здійснювалося з використанням нейромереж, що має архітектуру прямого поширення даних і зворотного поширення помилки (Feed-forwardbackprop, або – FfB) та навчена за алгоритмом Levenberg – Marquardt Algorithm [96, 97].

У таблиці А.3 наведено фактичне погодинне споживання електроенергії за один місяць – вересень 2019 року.

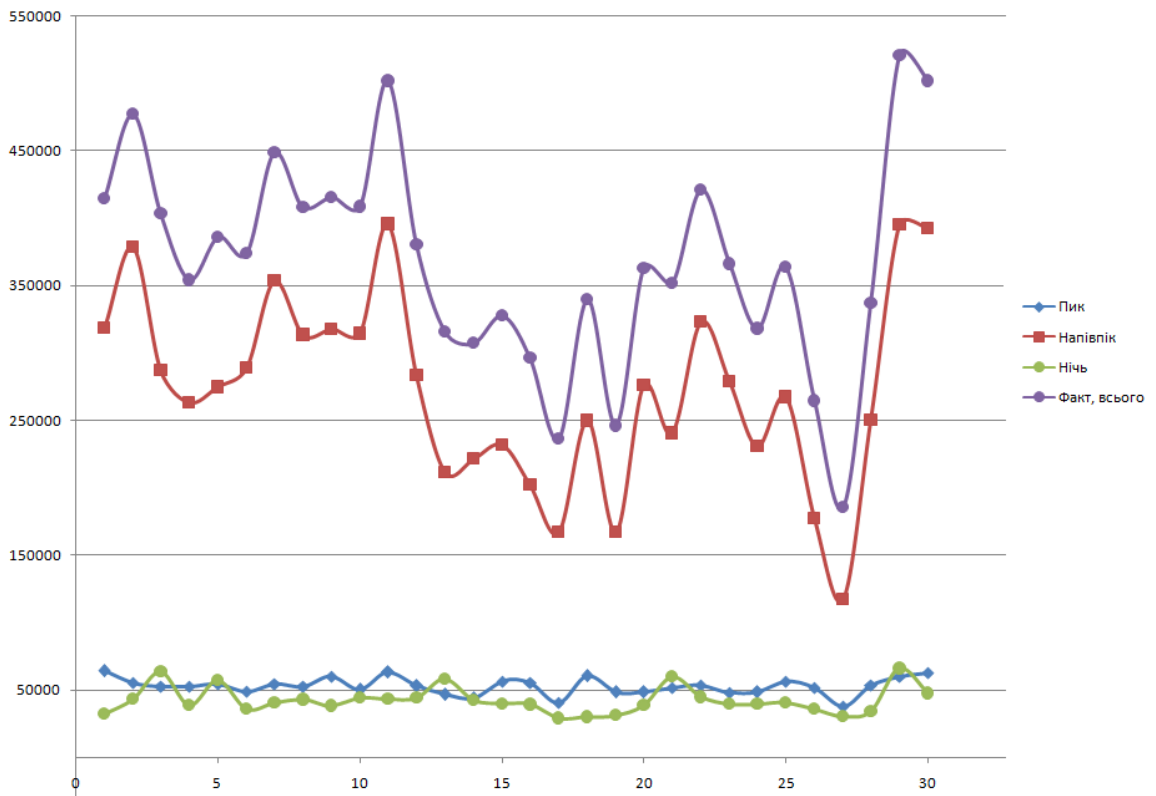


Рисунок 4.4 – Результати моніторингу енергоспоживання ПрАТ «ДНІПРОСПЕЦСТАЛЬ» за вересень 2019 року

У таблиці А.3 та на рисунку 4.4 наведено дані споживання електроенергії за вересень 2019 року з зазначенням результатів методики погодинного планування енергоспоживання [98]. Економія за вересень 2019 року склала – 76579,76 грн.

Таблиця 4.4 – Дані споживання електроенергії за місяць (вересень 2019 року)

Година	Пік	Напівпік	Ніч	Усього	Вартість, грн	(-) економ., грн.	(+) перевитр.,
1	64079	318327	32047	414452	868028,46		68266,96
2	55494	378738	43354	477586	1000256,31		200494,81
3	52421	287085	63726	403232	844529,29		44767,79
4	52671	262810	38615	354096	741618,85		-58142,65
5	54250	274749	57254	386252	808966,38		9204,88
6	48876	289209	35972	374057	783425,17		-16336,33
7	54440	353581	40561	448581	939508,23		139746,73
8	52377	313364	42706	408446	855449,49		55687,99
9	59821	317811	38205	415837	870929,20		71167,70
10	50089	314365	44248	408702	855985,66		56224,16
11	63107	395530	43432	502070	1051535,60		251774,10
12	53027	283449	44074	380550	797024,11		-2737,39
13	46381	211438	57985	315804	661420,09		-138341,41
14	43528	221566	42082	307175	643347,51		-156413,99
15	56435	231776	39525	327736	686410,47		-113351,03
16	55137	201855	39120	296111	620175,07		-179586,43
17	40622	166869	28787	236278	494860,83		-304900,67
18	60365	249721	29886	339972	712037,55		-87723,95
19	48235	166705	31046	245986	515193,27		-284568,23
20	48347	275946	38625	362918	760095,65		-39665,85
21	51628	240545	59907	352080	737396,54		-62364,96
22	53534	322976	44669	421179	882117,49		82355,99
23	48060	278834	39293	366187	766942,24		-32819,26
24	48124	230746	39288	318158	666350,30		-133411,20
25	56058	267224	40500	363782	761905,21		-37856,29
26	51714	177057	35588	264358	553671,58		-246089,92
27	37551	117352	30441	185344	388184,66		-411576,84
28	53080	250048	34094	337221	706275,85		-93485,65
29	59953	395307	65907	521167	1091532,35		291770,85
30	62498	392273	47201	501972	1051330,35		251568,85
Усього							-76579,76

У таблиці 4.6 наведено добові дані щодо розрахунку ризику перевитрат внаслідок відхилення факту від норми. Як бачимо за цю добу отримано перевитрату.

Таблиця 4.5 – Добові дані щодо аналізу якості вирішення завдань планування споживання електроенергії

Дата	17 лютого 2019 р.							
Година	Факт. ціна оператора ринка на ел.ен. без ПДВ грн./тис.кВт/г	Норма, кВт/г	Фактичне споживання кВт/г	Відхилення		Вартість, грн		
				кВт/г	%	Прогноз, грн	Факт. споживання, грн.	Відхилення, грн
1	959,11	43 500	47 294	3794	8,72	41721,29	45360,15	3638,86
2	959,11	48 500	46 741	-1759	3,63	46516,84	44829,76	-1687,07
3	959,11	44 500	41 245	-3255	7,31	42680,40	39558,49	-3121,90
4	959,11	39 500	34 940	-4560	11,54	37884,85	33511,3	-4373,54
5	959,11	39 500	37 009	-2491	6,31	37884,85	35495,7	-2389,14
6	959,11	48 600	56 021	7421	15,27	46612,75	53730,3	7117,56
7	959,11	45 550	47 845	2295	5,04	43687,46	45888,62	2201,16
8	959,12	41 600	38 844	-2756	6,63	39899,39	37256,06	-2643,33
9	2 048,23	47 600	53 464	5864	12,32	97495,75	109506,6	12010,82
10	2 048,23	49 200	48 043	-1157	2,35	100772,92	98403,11	-2369,80
11	2 048,23	42 500	44 825	2325	5,47	87049,78	91811,91	4762,13
12	2 015,14	49 500	48 053	-1447	2,92	99749,43	96833,52	-2915,91
13	2 000,00	50 500	58 254	7754	15,35	101000,00	116508	15508,00
14	2 000,00	45 500	52 513	7013	15,41	91000,00	105026	14026,00
15	1 999,00	44 550	47 452	2902	6,51	89055,45	94856,55	5801,10
16	1 999,00	42 550	48 290	5740	13,49	85057,45	96531,71	11474,26
17	2 015,14	38 550	35 886	-2664	6,91	77683,65	72315,31	-5368,33
18	2 048,00	43 450	51 875	8425	19,39	88985,60	106240	17254,40
19	2 048,00	43 550	32 866	-10684	24,53	89190,40	67309,57	-21880,83
20	2 048,00	47 600	48 728	1128	2,37	97484,80	99794,94	2310,14
21	2 015,08	45 600	43 670	-1930	4,23	91887,65	87998,54	-3889,10
22	2 048,23	42 600	48 200	5600	13,15	87254,60	98724,69	11470,09
23	2 048,23	41 600	43 809	2209	5,31	85206,37	89730,91	4524,54
24	959,12	40 650	33 017	-7633	18,78	38988,23	31667,27	-7320,96
Усього		1045750	1099884	22134	232,95	1744749,86	1798889	54139,12

Прогнозування електричних навантажень є важливим аспектом у економічних та технічних питаннях на металургійному підприємстві. Своєчасне отримання інформації про майбутнє навантаження дозволяє вибрати оптимальний режим роботи енергосистеми. Баланс електроенергії необхідний для забезпечення сталої роботи енергосистеми. Прогнозування є важливим фактором при складанні

балансу електроенергії в енергосистемі, впливаючи на вибір режимних параметрів та розрахункових електричних навантажень. У разі недотримання балансу страждає якість електроенергії (відбувається відхилення частоти та напруги від необхідних значень). Це відбивається на роботі всього устаткування підприємства. Розрахунок економічного ефекту від прогнозування енергоспоживання дозволяє відслідкувати перевитрати електроенергії на підприємстві.

4.2. Експериментальне дослідження ризиків на металургійному підприємстві за допомогою інформаційної технології

Для розробки аналітичної панелі було обрано JavaScript [98-99], оскільки ця мова має клієнтську частину, що забезпечує інтерактивність веб-сторінки. Для побудови графіків використано бібліотеку Plotly.js.

Аналітична панель включає такі розділи: моніторинг, аналіз часових рядів та прогнозування. У застосунку передбачено три кнопки та одне поле для введення даних (рисунок 4.5).

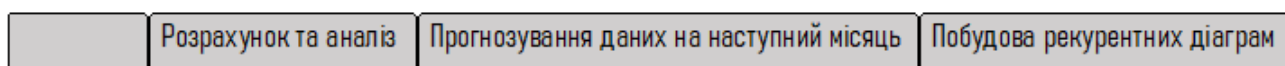


Рисунок 4.5 – Зовнішній вигляд кнопок для взаємодії з панеллю

При вводі в вільне віконце даних дня місяця панель виведе діаграму енергоспоживання на вказану користувачем дату.

Розділ «Моніторинг»

У цьому розділі представлена вичерпна інформація щодо енергоспоживання підприємства, яка включає відображення таких показників (рисунок 4.6):

- абсолютного значення споживання електроенергії (кВт);

- абсолютного значення ринкової ціни на електроенергію (грн);
- прогнозованого значення споживання електроенергії (кВт);
- прогнозованого значення ринкової ціни на електроенергію (грн);
- відхилення прогнозованого значення від фактичного споживання електроенергії (кВт);
- відхилення ціни (ризик перевитрат через неточність прогнозу) між прогнозованим і фактичним значенням (грн).;
- гранично допустимого значення шкідливих речовин;
- температури навколишнього середовища.

Діаграма добового споживання

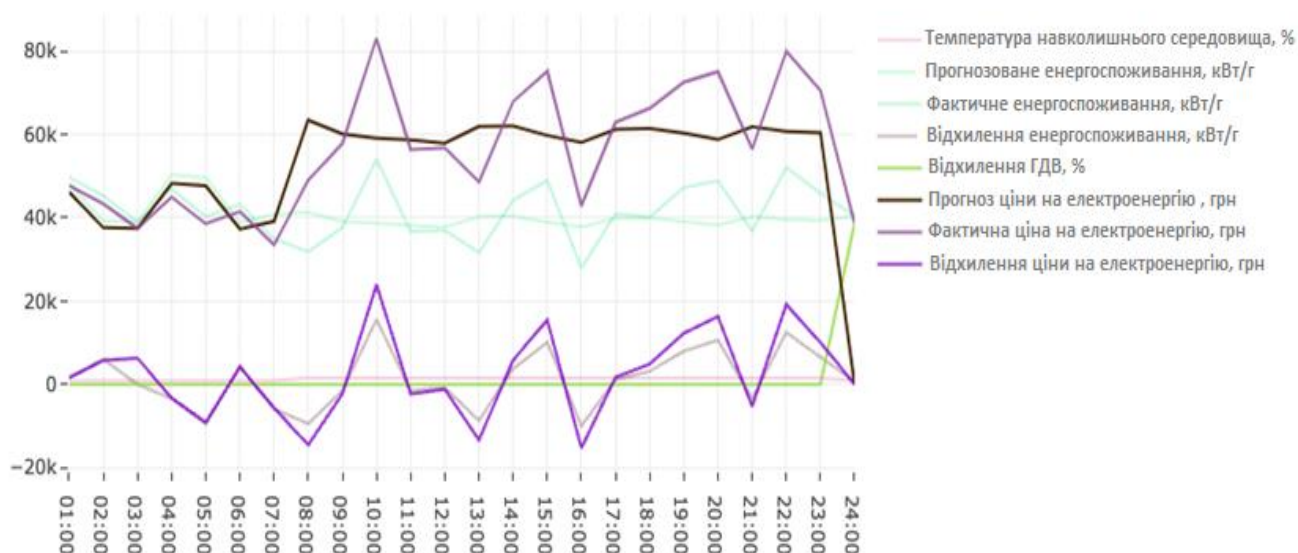


Рисунок 4.6 – Діаграма добового споживання

Функція моніторингу даних у режимі реального часу доступна при підключенні до ERP-системи ДСС. ERP ДСС SAPR3 працює на основі СУБД Oracle, використовуючи мову програмування PLSQL. Зберігання даних здійснюється у форматі таблиць.

Розділ «Прогнозування»

Прогнозування даних на майбутній місяць передбачає їх аналіз та формування прогнозів на 7 днів на основі інформації про енергоспоживання минулого місяця (рисунок 4.7). Прогнозування здійснюється за допомогою неймереж.

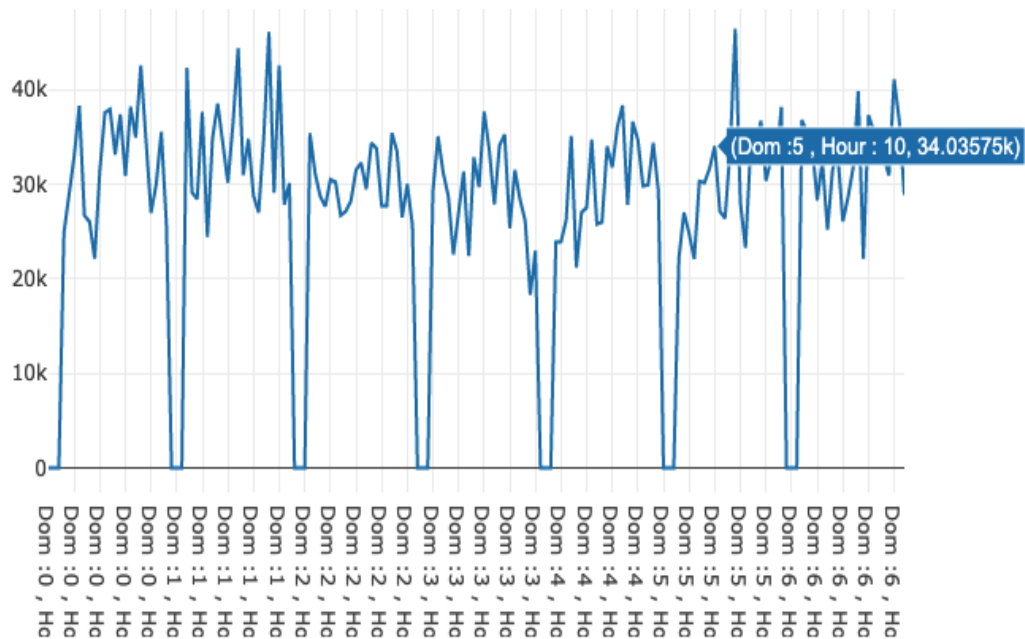


Рисунок 4.7 – Приклад 7-денного прогнозування, сформованого на основі даних за минулий місяць

Розділ «Аналіз часових рядів»

Крім того, на панелі відображається прямиий моніторинг даних за поточний день. (рисунок 4.8).

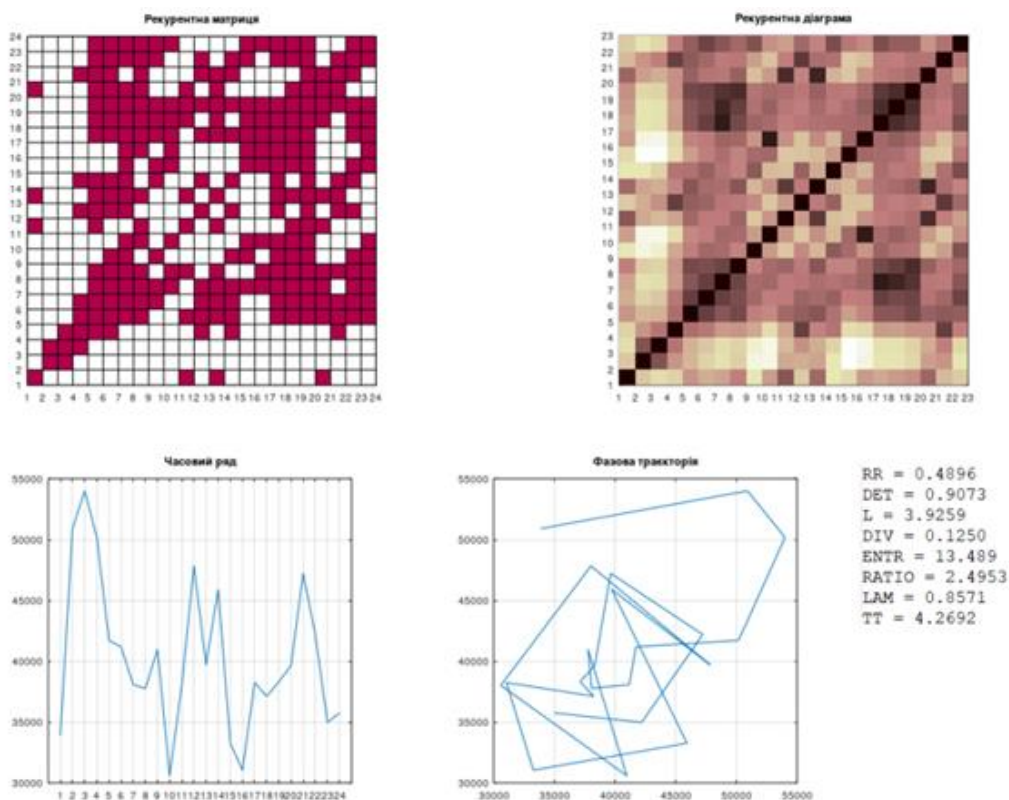


Рисунок 4.8 – Результат рекуррентного аналізу на панелі моніторингу

За допомогою візуального відображення рекуррентних діаграм та показників, які розраховуються системою моніторингу можна відслідковувати процес енергоспоживання підприємством в динаміці. Наприклад, якщо середні значення міри ентропії є доволі високими то можна зробити висновок, що досліджувані ряди містять деяку детерміновану складову, що визначається технологічними особливостями виробничого процесу. Детерміністичні процеси характеризуються довгими діагоналями та незначною кількістю окремих рекуррентних точок. Середня довжина вертикальних ліній показує тривалість перебування системи в певному стані.

4.3 Висновки за розділом 4

У розділі описано експериментальні дослідження розроблених методів оптимізації енергоспоживання на металургійному підприємстві. Розроблена

інформаційна система моніторингу для ідентифікації та управління економічними ризиками металургійних підприємств. Аналітична панель автоматизує роботу з даними:

а) здійснює моніторинг та аналіз абсолютного значення добового споживання електроенергії – наглядно можна побачити рівень споживання в різні періоди доби та виявити піки споживання;

б) здійснює прогнозування абсолютного значення споживання електроенергії – що допомагає сформувати вірний баланс електроенергії в енергосистемі, впливаючи таким чином на вибір режимних параметрів та розрахункових електричних навантажень;

в) за допомогою візуального відображення рекурентних діаграм та показників, які розраховуються системою моніторингу можна відслідковувати процес енергоспоживання підприємством в динаміці.

Моніторинг еколого-економічних ризиків дозволить отримати більш точну вихідну інформацію для прийняття управлінських рішень щодо їх впровадження в умовах різного навантаження обладнання у зв'язку з різною інтенсивністю виробництва.

Прогнозування здійснювалося з використанням розроблених нейронних моделей показав, що обраний підхід з експериментально відібраними архітектурами та алгоритмом навчання задовольняє необхідним вимогам, які були задані на початковому етапі створення динамічної моделі прогнозування на базі нейронної мережі. Ще одною важливою перевагою розробленого методу є те, що вдалося отримати досить точний прогноз, використовуючи мінімум вхідної інформації. Мається на увазі те, що на вхід мережі подається лише значення енергоспоживання, а всі особливості ряду (тренд, циклічна та випадкова складова), а також зовнішні фактори, що впливають на поведінку тимчасового ряду, не враховуються. І, тим не менш, отриманий прогноз говорить про те, що нейронна мережа здатна відновлювати функцію без додаткової інформації, яка часто може бути зовсім невідома. У цьому і полягає безперечна перевага нейронної мережі порівняно з іншими способами прогнозування.

Використовуючи дану інформацію (розрахований економічний ефект) – це заходи, реалізація яких в області енергетичного господарства забезпечує досягнення економічного ефекту за рахунок вдосконалення структури самого енергетичного виробництва та енергетичного балансу, а також заміщення енергією трудових ресурсів або дорогих і дефіцитних матеріалів. До даного аспекту енергозбереження відносяться і заходи, при яких економічний ефект досягається при додатковій витраті енергоресурсів, що забезпечує підвищення якості, надійності і терміну служби випускаємої, або організації виробництва, нової продукції з покращеними споживчими властивостями, поліпшення умов і безпеки праці, зниження негативного впливу на навколишнє середовище. Такі заходи носять енергозберігаючий характер, якщо економічний ефект, який досягається за їх рахунок перевищує витрати, пов'язані з додатковою витратою енергоресурсів.

Результати розділу 4 опубліковані в роботах автора : [96].

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розроблено моделі, методи та інформаційну технологію аналізу енергозбереження на металургійних підприємствах, які забезпечать вирішення науково-практичної проблеми управління процесами енергозбереження з урахуванням динаміки енергоспоживання, економічних та екологічних ризиків.

Проведені дослідження дозволили зробити такі висновки.

1. Вперше запропоновано концепцію підвищення енергозбереження на металургійному підприємстві на основі інформаційної технології управління процесами енергозбереження, на основі якої розроблено послідовність завдань, до якої входить технологія експрес-енергоаудиту, зниження похибки прогнозування енергоспоживання, візуалізація відхилень від нормативних показників, що дає можливість попереджати економічні та екологічні ризики.

2. В результаті експрес-енергоаудиту на основі даних про погодинне споживання електроенергії «ДНІПРОСПЕЦСТАЛЬ» і цінових зон день-ніч було показано, як можна отримати економічний ефект від заощадження енергоспоживання з урахуванням цінових зон та дано відповідні рекомендації.

3. При побудові моделей прогнозування в роботі проведено порівняння декількох архітектур нейронних мереж та обрано дві найкращі, які дають найбільшу точність прогнозування енергоспоживання на добу вперед – модель нелінійної авторегресії з алгоритмом навчання Levenberg-Marquardt та мережа LSTM. Економічний ефект від виконання даної роботи утворюється за рахунок зниження загальної похибки прогнозування споживання електроенергії.

4. За результатами дослідження впливу метеофакторів (температури, освітленості) на процеси енергоспоживання металургійних підприємств зроблено висновок, що в зимовий період року енергоспоживання значно залежить від температури, що було показано на даних 2019-2021 рр. і зовсім не залежить від хмарності. Щодо літнього періоду можна також стверджувати про залежність енергоспоживання від температури, але вона значно слабша. У

зв'язку з кліматичними змінами (щорічне підвищення температури) рекомендовано проводити моніторинг зміни температур, як засіб економії при розігріві печей.

5. Аналіз енергоспоживання та на основі рекурентного аналізу металургійного підприємства за сезонами зима-літо показав, що літній період характеризується більшою передбачуваністю, а також значно вищим показником затримки, який характеризує середній час, коли система може провести в більш-менш незмінному стані.

6. Удосконалення інформаційної технології моніторингу еколого-економічних ризиків металургійних підприємств за рахунок розробки інфологічної моделі аналітичної панелі дозволить оперативно реагувати на відхилення від нормативних показників, завдяки чому відбудеться підвищення екологічної дієвості, забезпечення економічно ефективного функціонування та сприяння розвитку гармонійної взаємодії громади та підприємств металургійного комплексу. Моніторинг еколого-економічних ризиків дозволить отримати більш точну вихідну інформацію для прийняття управлінських рішень щодо їх впровадження в умовах різного навантаження обладнання у зв'язку з різною інтенсивністю виробництва.

7. Запропоновані й розроблені в роботі методи, орієнтовані на специфічний клас промислових об'єктів – металургійні підприємства, можуть бути формалізовані для галузей, що також є енерговитратними. Створені моделі, методи та інформаційна технологія аналізу енергозбереження на металургійних підприємствах є внеском у розвиток і вдосконалення на промислових підприємствах.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Тарлопов, І. О. (2022). Статистичне оцінювання енергетичного ринку: методичний аспект. Підприємництво та інновації, (25), 128–132. <https://doi.org/10.32782/2415-3583/25.22>.
2. Дзяди́кевич, Ю. В. (2014). Енергетична безпека України та шляхи її реалізації. *Сталий розвиток економіки*, (2 (24)), 5–13.
3. Буркинський, Б., & Савчук, С. (2016). Інноваційний рівень виробництва та конкурентоспроможність чорної металургії України. *Економіка України*, (4), 4–15.
4. *Енергоспоживання*. <https://koeebox.com/ua/terminy-e/enerhospozhyvannja/>.
5. *Паризька угода*. Офіційний вебпортал парламенту України. https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/995_161#Text.
6. Толбатов, В. А., & Лебединський, І. Л. (2009). *Організація систем енергозбереження на промислових підприємствах*. СумДУ.
7. Кійко, С.Г. (2021). *Методологія предиктивної адаптації управління портфелями проєктів енергозбереження на металургійних підприємствах*, дис. д-ра техн. наук: 05.13.22. Запоріжжя.
8. Мазов, М. М. (2016). Динамічна модель управління портфелем проєктів металургійного підприємства. *Управління проєктами та розвиток виробництва*, (2 (58)), 26–35. Доступно: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Uprv_2016_2_6.
9. *Навчально-науковий інститут енергозбереження та енергоменеджменту. 25 років становлення та розвитку*. (2022). КПІ ім. Ігоря Сікорського.
10. Цюцюра, С. В. (2007). *Управління інноваційними проєктами модернізації підприємств енергоємних галузей*, дис. д-ра техн. наук: 05.13.22. Київський національний ун-т будівництва і архітектури.
11. Bunse, K., Vodicka, M., Schönsleben, P., Brühlhart, M., & Ernst, F. O. (2011). Integrating energy efficiency performance in production management – gap analysis

between industrial needs and scientific literature. *Journal of Cleaner Production*, 19(6-7), 667–679. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.11.011>.

12. Wang, H., Zhou, P., & Zhou, D. Q. (2013b). Scenario-based energy efficiency and productivity in China: A non-radial directional distance function analysis. *Energy Economics*, 40, 795–803. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2013.09.030>.

13. Brunke, J.-C., Johansson, M., & Thollander, P. (2014). Empirical investigation of barriers and drivers to the adoption of energy conservation measures, energy management practices and energy services in the Swedish iron and steel industry. *Journal of Cleaner Production*, 84, 509–525. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.04.078>.

14. Bunse, K., Vodicka, M., Schönsleben, P., Brühlhart, M., & Ernst, F. O. (2011b). Integrating energy efficiency performance in production management – gap analysis between industrial needs and scientific literature. *Journal of Cleaner Production*, 19(6-7), 667–679. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.11.011>.

15. Ren, Y., & Bao, H. (2016). Modeling and Simulation of Metallurgical Process Based on Hybrid Petri Net. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 157, 012018. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/157/1/012018>.

16. Belt, C. K. (2017). *Energy Management for the Metals Industry*. Taylor & Francis Group.

18. *Економічний огляд металургійної галузі України – РЕЙТИНГ. Бізнес в офіційних цифрах*. <https://rating.zone/ekonomichnyj-ohliad-metalurhijnoi-haluzi-ukrainy/>.

19. Павлов, Г., & Кулагін, Д. (2019). Статистичне дослідження стану енергозабезпечення АПК України. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету*, 9(1), 18–30.

17. Мазур, В. Л. (2010). Металургія України: стан, конкурентоспроможність, перспективи. *Металургійна та гірничорудна промисловість*, (2), 12–16.

18. Гончарова, О. М. (2004). Проблеми розвитку металургійних підприємств України в сучасних умовах. *Теоретичні та прикладні питання економіки*, (Вип. 5), 146–150.
19. Кулицький, С. (2016). Українська чорна металургія: стан, проблеми, перспективи. *Україна: події, факти, коментарі*, (Вип. 5), 44–65.
20. Юськів, О. (2018). Управління енергозберігаючими заходами металургійного підприємства. IX міжнародна науково-практична конференція *Сучасні проблеми та досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій* (с. 105–106).
21. Слободянюк, К., & Ключковський, О. (2022). Оцінка конкурентноздатності продукції промислового підприємства. *Економіка та суспільство*, (44). <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2022-44-59>.
22. Кійко, С. Г. (2020а). Управління ризиками при реалізації енергетичної програми підприємства. *Системи озброєння і військова техніка*, (4(64)), 75–85. <https://doi.org/10.30748/soivt.2020.64.10>.
23. Цюцюра, С. В. (2007). *Управління інноваційними проєктами модернізації підприємств енергоємних галузей*, дис. д-ра техн. наук: 05.13.22. Київський національний ун-т будівництва і архітектури.
23. Піріашвілі, О. Б. (2007). Пріоритетний розвиток малих промислових підприємств. *Формування ринкових відносин в Україні*, (11 (78)), 112–117.
24. Момот, А. С. (2011). Вплив деструктивних чинників на енергетичну безпеку України. *Політологічний вісник*, (Вип. 52), 466–472.
25. Афанасьєв, М., & Салашенко, Т. (2014). *Стратегія підвищення енергоефективності промисловості регіону: теоретико-методичні аспекти формування*. ХНЕУ.
26. Братковська, К. О. (2012). Підвищення ефективності реалізації програм енергозбереження промислових підприємств. *Держава та регіони. Економіка та підприємництво*, (2 (65)), 73–79.
27. Петрова, К. Г., & Серебренніков, Б. С. (2014). Комплексне регулювання режиму електронавантаження промислових споживачів. *Преселектор*, (1), 16–21.

28. Zune, K., Vodicka, M., Schönsleben, P., Brühlhart, M., & Ernst, F. O. (2011a). Integrating energy efficiency performance in production management – gap analysis between industrial needs and scientific literature. *Journal of Cleaner Production*, 19(6-7), 667–679. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.11.011>.

29. Wang, X., Yu, Z., Xi, P., Chu, G., Lai, S., Li, J., & Zhang, Y. (2020). An Energy Consumption Prediction LSTM Model of Metallurgy Enterprises. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 495, 012014. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/495/1/012014>.

30. Константинов, П. В. (2011). Перспективи розвитку паливно-енергетичного комплексу України. *Економіка та держава*, (6), 89–91.

31. Кулик, І. М. (2012). Сучасний стан та основні фактори розвитку чорної металургії в Україні. *Бізнесінформ*, 116–121.

32. Борисенко, О. (2013). Аналіз та оцінка забезпечення основними ресурсами виробничої діяльності металургійних підприємств України. *Економіка промисловості*, (2), 28–39.

33. Blinov, I. V. (2021). Problems of functioning and development of a new electricity market model in Ukraine (according to the scientific report at the meeting of the Presidium of NAS of Ukraine, February 3, 2021). *Visnik Nacional'noi' akademii' nauk Ukraini*, (03), 20–28. <https://doi.org/10.15407/visn2021.03.020>.

34. Тімченко, А. В. (2014). *Концептуальні основи енергозбереження в Україні* [Thesis, Сумський державний університет]. eSSUIR – Electronic Sumy State University Institutional Repository. <http://essuir.sumdu.edu.ua/handle/123456789/37940>.

35. Верховна Рада України. Закон України від 21.10.2021 № 1818-IX Про енергетичну ефективність. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1818-20#n436>.

36. Про затвердження Державної програми розвитку та реформування гірничо-металургійного комплексу на період до 2011 року. (б. д.). Офіційний вебпортал парламенту України. <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/967-2004-п>.

36. Деякі питання стабілізації роботи підприємств хімічної галузі та гірничо-металургійного комплексу. Офіційний вебпортал парламенту України. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/289-2010-п#Text>.

37. Деякі питання стабілізації роботи підприємств хімічної галузі та гірничо-металургійного комплексу. Офіційний вебпортал парламенту України. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/289-2010-п#Text>.

38. Про схвалення Енергетичної стратегії України на період до 2050 року. Офіційний вебпортал парламенту України. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/373-2023-р#Text>.

39. Григоренко, Ю. (2020, 30 квітня). *Невтішні підсумки: перші наслідки кризи для металургії* — Статті — *GMK Center*. GMK. <https://gmk.center/ua/posts/nevtishni-pidsumki-pershi-naslidki-krizi-dlya-metalurgii>.

40. Моїсєєв, В. (2024). *Що стоїть за нинішніми показниками зростання галузі металургії*. The Page. <https://thepage.ua/ua/economy/stan-galuzi-metalurgiyi-u-2024-roci>.

41. Моїсєєв, В. (2023). *Відновлення до рівня 60%: стан української чорної металургії в липні 2023 року*. The Page. <https://thepage.ua/ua/economy/stan-ukrayinskoji-chornoji-metalurgiyi-u-lipni-2023-roku>.

42. *Home* | Державна Митна Служба. Державна Митна Служба. <https://customs.gov.ua>.

43. *Металургія майбутнього - сучасні тренди та напрямки розвитку* - *Метінвест-СМЦ*. Metinvest. https://metinvest-smc.com/ua/articles/metalurgiya-maibutnyogo-sucasni-trendi-ta-napryamkirozvitku/?srsltid=AfmBOoo0dyMebgYe3jWGG5b0P8-idIUvuImHg9rmQCs5o0E87O6_rngA.

44. Никифорова, В. (2010). Конкурентна перевага металургії України на регіональних ринках збуту металопродукції. *Економіка промисловості*, 48–55.

45. Слободчикова, О. А. (2012). Механізм забезпечення стратегічної стійкості підприємства гірничо-металургійного комплексу в умовах проведення реструктуризації. *Економічний часопис* - 21, (7/8), 44–46.

46. Бориченко, О. В., & Находов, В. Ф. (2023). *Енергетичний менеджмент. Частина 2*. навч. посіб. для здобувачів ступеня бакалавра за освітньою програмою «Енергетичний менеджмент та енергоефективні технології» спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка / КПІ ім. Ігоря Сікорського.

47. ДСТУ 4713:2007 *Енергозбереження. Енергетичний аудит промислових підприємств. Порядок проведення та вимоги до організації робіт*. БУДСТАНДАРТ Online - нормативні документи будівельної галузі України. https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=26795

48. *Про енергетичну ефективність будівель*. Офіційний вебпортал парламенту України. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2118-19#Text>.

49. *Про затвердження Методики розрахунку норм питомих витрат паливно-енергетичних ресурсів на підприємствах водопровідно-каналізаційного господарства*. Офіційний вебпортал парламенту України. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1606-12#Text>.

50. Долінський, А. А. (2006). Енергозбереження та екологічні проблеми енергетики. *Вісник Національної академії наук України.*, (2), 24–32.

51. Федіна, І. (2014). Енергозбереження при виробництві чорних та кольорових металів. *Інформаційні технології в освіті, науці та виробництві*, 9(4), 152–159.

52. Швець, Є., & Рулікова, Н. (2015). Виявлення ризиків в інноваційних програмах розвитку металургійного підприємства. *Вісник Національно-технічного університету “Харківського політехнічного інституту”*, 2(11), 152–160.

53. Schulze, M., Nehler, H., Ottosson, M., & Thollander, P. (2016). Energy management in industry – a systematic review of previous findings and an integrative conceptual framework. *Journal of Cleaner Production*, 112, 3692–3708. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.06.060>.

54. Yuskiv, O. (2021). Accounting seasonal temperature variations in forecasting energy consumption of a metallurgical enterprise. *Second international conference "MATLAB and computer calculations in education, science and engineering"*. 67 – 71.

55. Бакурова, А.В., & Юськів, О.І. (2022). Система енергоаудиту при реалізації проєктів енергозбереження на металургійному підприємстві. *Інформаційні технології: теорія і практика: V Всеукр. Інтернет-конф. здобувачів вищої освіти і молодих учених, 17-18 березня 2022 р.*
56. General Energy Resources. (2017). У *Energy Management for the Metals Industry* (с. 155–156). Routledge. <https://doi.org/10.1201/9781315156392-8>.
57. Кіюко, S., Druzhinin, E., & Prokhorov, O. (2020). Модель планування енергоспоживання металургійного підприємства. *Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць, 1(59), 27–32.* <https://doi.org/10.26906/sunz.2020.1.027>.
58. Дубровін, В. І., & Юськів, О. (2019). Енергозбереження та підвищення енергетичної ефективності виробництва на металургійних підприємствах. *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні, (1), 93–97.*
59. Дубровін, В. І., & Юськів, О. (2019). Енергозбереження та підвищення енергетичної ефективності виробництва на металургійних підприємствах. *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні, (1), 93–97. Вісник Херсонського національного технічного університету, (2), 61–69.*
60. Дубровін, В. І., & Юськів, О. (2019). Структура інформаційної технології управління портфелями проєктів енергозбереження на металургійних підприємствах. *Вісник Херсонського національного технічного університету, (4), 46–55.*
61. Дубровін, В. І., & Юськів, О. (2019). Управління портфелями проєктів енергозбереження на металургійних підприємствах. *Радіоелектроніка та інформатика, (2(85)).* [https://doi.org/10.30837/1563-0064.2\(85\).2019.184743](https://doi.org/10.30837/1563-0064.2(85).2019.184743).
62. The Enterprise Portfolio Management. (2009). *Project Portfolio Management*. John Wiley & Sons, Inc. <https://doi.org/10.1002/9780470549155>.
63. Юськів О. І. (2021). Урахування метеофакторів в моделі прогнозування енергоспоживання металургійного підприємства. *Інформаційні технології: теорія і практика: тези доповідей 4-тої Всеукраїнської інтернет-конференція здобувачів вищої освіти і молодих учених (Дніпро-Запоріжжя-Харків).* 123-126.

64. *Метеопост – Архів погоди*. "Метеопост" – погода в Україні. <https://meteopost.com/weather/archive/>.

65. *Рада прийняла законопроект про енергетичну ефективність в 1-му читанні*. <https://expro.com.ua/novini/rada-priynuala-zakonoproekt-pro-energetichnu-efektivnst-v-1-mu-chitann>.

66. Tremyasov, V. A., Zograf, Y. E., & Krivenko, T. V. (2020). Risk Assessment of Renewable Energy Generation Systems Projects. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*, 702–711. <https://doi.org/10.17516/1999-494x-0259>.

67. Бутнік, Д. (2013). Управління інвестиційними ризиками при реалізації енергозберігаючих проектів у будівельній галузі. *Вісник Хмельн. Нац. університету.*, (4(1)), 131–135.

68. Кійко, С. Г. (2020). Управління ризиками при реалізації енергетичної програми підприємства. *Системи озброєння і військова техніка*, (4(64)), 75–85. <https://doi.org/10.30748/soivt.2020.64.10>.

69. Goncharenko, L. P., Filin, S. A., & Nalesnaya, E. E. (2016). Strategic risk management in innovative metallurgical investment. *Steel in Translation*, 46(1), 42–44. <https://doi.org/10.3103/s0967091216010046>.

70. Бондаренко, А. О., Парфененко, Ю. В., Парфененко, Ю. В., Parfenenko, Y. V., Неня, В. Г., Неня, В. Г., & Nenia, V. H. (2015). *Підтримка прийняття рішень при управлінні режимами теплозабезпечення об'єктів соціально бюджетної сфери на основі нечіткої логіки* [Thesis, Сумський державний університет]. eSSUIR – Electronic Sumy State University Institutional Repository. <http://essuir.sumdu.edu.ua/handle/123456789/40861>.

71. Zou, W.-L., & Wu, S. (2015). Risk Analysis of Energy Management under Contracts. *У 2015 International Conference on Management Science and Management Innovation (MSMI 2015)*. Atlantis Press. <https://doi.org/10.2991/msmi-15.2015.56>.

72. Гуляницький, Л. Ф., & Бондар, Т. Г. (2018). Дослідження ефективності адаптивних методів прогнозування. *Комп'ютерна математика*, (1), 53–60. <http://essuir.sumdu.edu.ua/handle/123456789/31158>.
73. Wang, J., Chen, X., Zhang, F., Chen, F., & Xin, Y. (2021). Building Load Forecasting Using Deep Neural Network with Efficient Feature Fusion. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 9(1), 160–169. <https://doi.org/10.35833/mpce.2020.000321>.
74. Demuth, H. B., Beale, M. H., & Hagan, M. T. (2002). *Neural Network Design*. Martin Hagan. <http://hagan.okstate.edu/NNDesign.pdf>. Accessed Sept 2024.
75. Lee, P., Lam, P. T. I., Yik, F. W. H., & Chan, E. H. W. (2013). Probabilistic risk assessment of the energy saving shortfall in energy performance contracting projects—A case study. *Energy and Buildings*, 66, 353–363. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.07.018>.
76. Андросов, В. М. (2014). *Прогнозування погодинного електроспоживання з використанням штучних нейронних мереж*. Актуальні проблеми енергетики.
77. Tan, X., Ao, G., Qian, G., Zhou, F., Li, W., & Liu, C. (2023). Research on Power Load Forecasting Using Deep Neural Network and Wavelet Transform. *International Journal of Information Technologies and Systems Approach*, 16(2), 1–13. <https://doi.org/10.4018/ijitsa.322411>.
78. Соловійова, І. А., & Дзюба, А. П. (2013). Прогнозування електроспоживання з урахуванням факторів технологічного та ринкового середовища. *Науковий діалог*, 97–113.
79. Бодянский, В. Е., & Руденко, Г. О. (2002). *Штучні нейронні мережі архітектури, навчання, застосування*. Телетех 317.
80. Feed-forward networks. (1990). У *Physical Models of Neural Networks* (с. 87–97). World scientific. https://doi.org/10.1142/9789814434492_0008.
81. Bakurova, A., Yuskiv, O., Shyrokora, D., Riabenko, A., & Tereschenko, E. (2021). Neural Network Forecasting of energy consumption of a metallurgical

enterprise. *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, (1 (15)), 14–22. <https://doi.org/10.30837/itssi.2021.15.014>.

82. Ivashchenko, H., Ponomarev, V., & Kholiev, V. (2023). Короткострокове прогнозування нестационарних часових рядів з використанням моделей MLP ТА LSTM. *Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць*, 1(71), 91–95. <https://doi.org/10.26906/sunz.2023.1.091>.

83. Choi, J. M., Bae, B. H., & Kim, S. Y. (1999). Divergence in perpendicular recurrence plot; quantification of dynamical divergence from short chaotic time series. *Physics Letters A*, 263(4-6), 299–306. [https://doi.org/10.1016/s0375-9601\(99\)00751-3](https://doi.org/10.1016/s0375-9601(99)00751-3).

84. Marwan, N., Carmenromano, M., Thiel, M., & Kurths, J. (2007). Recurrence plots for the analysis of complex systems. *Physics Reports*, 438(5-6), 237–329. <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2006.11.001>.

85. Bakurova, A., Divocha, I., Kiyko, S., & Yuskiv, O. (2023). Recurrent analysis of energy consumption of a metallurgical enterprise. *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, (1 (23)), 14–24. <https://doi.org/10.30837/itssi.2023.23.014>.

86. Бакурова, А., & Юськів, О. (2024). Аналіз залежності енергоспоживання металургійного підприємства від метеофакторів. *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security*, (1), 12–20. <https://doi.org/10.32782/it/2024-1-2>.

87. Medvinsky, A. B., & Rusakov, A. V. (2011). Chaos and order in stateless societies: Intercommunity exchange as a factor impacting the population dynamical patterns. *Chaos, Solitons & Fractals*, 44(6), 390–400. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2010.12.010>.

88. Medvinsky, A. B., Rusakov, A. V., & Nurieva, N. I. (2013). Integer-based modeling of population dynamics: Competition between attractors limits predictability. *Ecological Complexity*, 14, 108–116. <https://doi.org/10.1016/j.ecocom.2012.05.005>.

89. Медвінський, А. Б., Нурієва, Н. І., Русаков, А. В., & Адамович, Б. В. (2017). *Детермінований хаос і проблема передбачуваності динаміки популяцій*. Біофізика.
90. Ellner, S., & Turchin, P. (1995). Chaos in a Noisy World: New Methods and Evidence from Time-Series Analysis. *The American Naturalist*, 145(3), 343–375. <https://doi.org/10.1086/285744>.
91. Фіз91Gretl. <https://gretl.sourceforge.net/ru.html>.
92. Yalta, A. T., Cottrell, A., & Rodrigues, P. C. (2024). Computational econometrics with gretl. *Computational Statistics*. <https://doi.org/10.1007/s00180-024-01523-z>.
93. Bakurova, A., & Yuskiv, O. (2024). The effect of noise on recurrent diagrams of energy consumption of a metallurgical enterprise. *Technology audit and production reserves*, 4(1(78)), 11–16. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2024.309790>.
94. Park, D. C., El-Sharkawi, M. A., Marks, R. J., Atlas, L. E., & Damborg, M. J. (1991). Electric load forecasting using an artificial neural network. *IEEE Transactions on Power Systems*, 6(2), 442–449. <https://doi.org/10.1109/59.76685>.
95. Bakurova, A. V., Tereshchenko, E. V., & Yuskiv, O. I. (2022). Information System for Monitoring Economic and Environmental Risks of the Metallurgical Enterprise. *У 16th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment*. European Association of Geoscientists & Engineers. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2022580134> – індексовано в Scopus.
96. Бакурова, А. В., Дівоча, І. О., & Кійко, С. Г., & Юськів, О. І. (2022). Рекурентний аналіз енергоспоживання металургійного підприємства. *Тиждень науки 2022: щорічна наук.-практ. конф. викладачів, науковців, молодих учених, аспірантів та здобувачів вищої освіти НУ «Запорізька політехніка», 18-22 квітня 2022 р.: тези доповідей*.
97. Чепенко, Т. Є. (2013). *Прогнозування нестационарних часових рядів на основі штучних нейронних мереж з елементами часової затримки*. М-во освіти і науки, молоді та спорту України, Харк. нац. ун-т радіоелектроніки.

98. *Що make Java Script?* [https://developer.mozilla.org/ru/docs/Learn/JavaScript/First_steps/What is JavaScript](https://developer.mozilla.org/ru/docs/Learn/JavaScript/First_steps/What_is_JavaScript).

99. Bakurova, A., Yus'kiv, O., Shyrokograd, D., Tereschenko, E., & Riabenko, A. (2021). The development of energy consumption forecasting model for a metallurgical enterprise. *SHS Web of Conferences*, 107, 05004. <https://doi.org/10.1051/shsconf/202110705004>.

ДОДАТОК А

Фрагменти вхідних даних та результати експериментальних досліджень

Таблиця А.1 – Ризик перевитрат за неточності прогнозу використаної електроенергії (літній період) (Джерело: складено автором за даними про погодинне енергоспоживання за лютий 2021 року на ПрАТ «ДНІПРОСПЕЦСТАЛЬ» та прогнозних даних на добу вперед, отриманих в пакеті Matlab)

Годи на	Зимовий період							
	Факт. ціна оператора ринка на ел.ен. без ПДВ грн./тис. кВт/г	Прогноз, кВт/г	Фактичне Споживання кВт/г	Відхилення		Вартість, грн		
				кВт/г	%	Прогноз, грн	Факт. споживання, грн.	Відхилення, грн
1	1 225	49973	46169	-3804	7,61	61216,93	56557,03	-4659,90
2	1 225	44991	51488	6497	14,44	55113,98	63072,8	7958,83
3	1 180	52246	55227	2981	5,71	61650,28	65167,86	3517,58
4	1 225	41200	52295	11095	26,93	50470,00	64061,38	13591,38
5	1 180	52547	48143	-4404	8,38	62005,46	56808,74	-5196,72
6	1 225	47776	54852	7076	14,81	58525,60	67193,7	8668,10
7	1 225	37727	42719	4992	13,23	46215,58	52330,78	6115,20
8	1 953	41067	42936	1869	4,55	80203,85	83854,01	3650,16
9	1 953	32358	43535	11177	34,54	63195,17	85023,86	21828,68
10	1 953	36638	53035	16397	44,75	71554,01	103577,4	32023,34
11	1 953	46762	50037	3275	7,00	91326,19	97722,26	6396,08
12	1 953	51068	38841	-12227	23,94	99735,80	75856,47	-23879,33
13	1 871	47792	47867	75	0,16	89418,83	89559,16	140,33
14	1 871	46132	50118	3986	8,64	86312,97	93770,78	7457,81
15	1 871	54184	37455	-16729	30,87	101378,26	70078,31	-31299,96
16	1 970	49037	32213	-16824	34,31	96587,69	63449,62	-33138,06
17	2 048	60326	38989	-21337	35,37	123561,52	79858,44	-43703,08
18	2 048	41532	31038	-10494	25,27	85067,09	63572,96	-21494,13
19	2 048	58703	50119	-8584	14,62	120237,25	102655,2	-17582,01
20	2 048	44223	54914	10691	24,18	90578,88	112476,5	21897,63
21	2 034	61548	54555	-6993	11,36	125188,63	110964,9	-14223,76
22	2 048	48902	43861	-5041	10,31	100161,57	89836,54	-10325,03
23	2 035	49545	48840	-705	1,42	100824,08	99389,4	-1434,68
24	1 229	44767	46017	1250	2,79	55015,96	56552,13	1536,18
Усього		1141044	1115263	-25781	405,21	1975545,56	1903390	-72155,39

Таблиця А.2 – Ризик перевитрат за неточності прогнозу використаної електроенергії (зимовий період) (Джерело: складено автором за даними про погодинне енергоспоживання за серпень 2021 року на ПрАТ «ДНПРОСПЕЦСТАЛЬ» та прогнозних даних на добу вперед, отриманих в пакеті Matlab)

Година	Літній період							
	Факт. ціна оператора у ринка на ел. ен. без ПДВ грн./тис. кВт/г	Прогноз, кВт/г	Фактичне споживання кВт/г	Відхилення		Вартість, грн		
				кВт/г	%	Прогноз, грн	Факт. споживання, грн.	Відхилення, грн
1	1 170	48230	34205	-4025	8,35	56429,10	51719,85	-4709,25
2	735	44866	32530	-2336	5,21	32976,51	31259,55	-1716,96
3	735	60042	37774	3732	7,93	34575,87	37318,89	2743,02
4	735	41282	35133	-2149	5,21	30342,27	28762,76	-1579,52
5	735	52745	34198	1453	2,75	38767,58	39835,53	1067,96
6	735	48067	32733	3666	7,63	35329,25	38023,76	2694,51
7	735	36863	24535	-2328	6,32	27094,31	25383,23	-1711,08
8	735	40876	23658	2782	6,81	30043,86	32088,63	2044,77
9	735	37023	28571	1548	4,18	27211,91	28349,69	1137,78
10	735	35004	25804	-200	0,57	25727,94	25580,94	-147,00
11	735	57308	32747	-1561	2,72	42121,38	40974,05	-1147,34
12	735	50772	33811	3039	5,99	37317,42	39551,09	2233,67
13	735	47987	29253	1266	2,64	35270,45	36200,96	930,51
14	735	45806	28163	2357	5,15	33667,41	35399,81	1732,40
15	735	54559	36368	-3191	6,07	38630,87	36285,48	-2345,38
16	735	43756	27454	3698	8,45	32160,66	34878,69	2718,03
17	1 925	44380	31719	-661	1,49	85431,50	84159,08	-1272,43
18	1 920	51850	33629	1779	3,43	99552,00	102967,7	3415,68
19	1 949	61816	36004	4188	6,77	120479,38	128641,8	8162,41
20	2 656	41486	26514	-14972	36,09	110186,82	70421,18	-39765,63
21	2 656	34582	31113	-3469	10,03	91849,79	82636,13	-9213,66
22	2 656	48614	33851	-2763	5,68	129118,78	121780,3	-7338,53
23	2 656	47867	25571	-2296	4,80	127134,75	121036,6	-6098,18
24	1 244	34234	39551	5317	15,53	42587,10	49201,44	6614,35
Усього		1110015	754889	-5126	169,79	1364006,88	1322457	-41549,88

Таблиця А.3 – Фактичне погодинне споживання електроенергії за вересень 2019 року

Година	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Дата	Споживання електроенергії, кВт*год																							
01.09	40533	32197	27088	33161	38378	43930	51070	35578	34719	29514	41919	50095	50576	44209	49871	41151	50918	46607	56725	46554	35971	39975	47375	34337
02.09	41899	34808	38430	56413	38847	37927	50210	32564	46503	51403	45439	40216	48646	59158	41317	46380	38368	36024	46746	61446	38798	56757	37123	40162
03.09	37604	34493	32061	47202	41650	38326	36879	40655	40309	35620	36184	37642	42017	43014	39316	45815	45064	36955	36962	47216	44630	35350	40014	34251
04.09	42028	47384	36973	38956	46767	41683	38375	30075	36446	41773	29871	43808	39603	50266	44834	37182	45453	47022	33821	41992	37856	34891	24407	30624
05.09	28128	42208	36434	31874	31890	34916	46818	28274	36021	36710	46272	34397	34671	45350	42387	48085	51113	37114	48817	46241	39759	39918	45828	39022
06.09	38687	34454	28903	29557	36023	33051	29453	40413	40219	42257	45381	36200	35197	44804	61931	37413	31033	44996	45074	48965	40490	43610	43023	50917
07.09	48966	33917	41462	49061	47157	45502	37767	43219	33593	42100	44327	34761	38120	42293	53118	29485	49737	47555	47140	43723	41261	54799	49016	38495
08.09	35442	36637	52698	50065	43410	33904	44673	33764	41174	41887	45061	33644	43107	45348	42978	34572	39600	42046	45156	48032	32966	45469	49088	35717
09.09	33775	43852	39486	49328	35471	40413	54924	34930	33249	28384	36314	46594	43552	46483	44420	33872	46618	49378	54521	32197	48493	40832	53898	30824
10.09	40799	54754	48802	47579	51074	44219	35594	43707	41037	29578	31807	39268	27226	44303	41442	42480	46167	37811	39695	33929	54004	49102	35729	36586
11.09	48615	48831	47027	42712	29736	48867	50441	40011	40325	41656	36210	44671	57189	52673	48644	36571	55517	49696	47052	41625	44329	50814	51367	35480
12.09	33875	50904	54006	50178	41715	41177	38077	37772	40973	30588	38017	47833	39704	45926	33265	31048	38246	37120	38324	39639	47224	42198	34979	35750
13.09	43565	44913	47443	40586	46946	31304	40647	33600	35815	31548	41197	41060	29775	39553	35370	26381	31265	34836	35423	26280	34831	36721	51681	24051
14.09	40720	40142	51186	45977	37457	30068	39647	35191	47325	32649	33099	36191	27723	38128	44727	39760	31218	33486	30978	35629	42009	35033	33012	33806
15.09	45072	47077	42755	40449	29752	37946	45500	38151	37141	31579	38474	47622	52789	47268	30196	28736	38947	39594	38380	37626	26801	33136	33448	27282
16.09	39343	47185	36881	37783	26175	37906	46904	35312	38489	39067	38171	46112	32877	36917	40370	27551	38915	27177	54644	43592	41131	29835	22646	19112
17.09	42395	36226	34165	21712	22042	24529	28340	25480	25999	29141	29152	27217	31828	27159	28023	21909	24455	29672	30987	29384	23081	22296	35373	23696
18.09	29184	24463	22384	32417	32459	31944	23551	24915	36347	38787	34021	36252	45311	58944	43186	38154	54860	53369	57038	49149	49644	39011	44031	28533
19.09	36740	25636	35101	30406	32833	34004	37815	26118	31722	37293	28411	36763	35257	39767	41856	26243	26136	33857	46783	32754	27107	38927	57366	35072
20.09	44311	40622	36973	51808	43071	43518	31698	35494	32553	34301	29758	27789	41593	42690	47802	36261	31073	34760	44934	53055	42848	38146	42119	43721
21.09	47904	33874	37182	35857	41262	34696	36976	37119	46663	48747	36704	51019	46798	43365	36027	37579	35671	43468	25024	30134	28161	34502	35622	33705
22.09	42169	54948	48749	43640	47692	40939	53355	42242	37513	40922	51636	49132	48549	36856	39050	36290	34020	32845	34434	45766	43696	32037	33899	36778
23.09	40089	44288	37923	39229	40943	49024	37286	31117	44130	39060	41940	29043	43816	54560	39199	26524	29908	40927	41472	38056	39576	38248	50983	36823
24.09	53105	44685	53868	44110	46509	46066	46710	28473	35647	28932	38742	42021	38575	42390	41164	29146	30628	32092	33270	28079	27538	34793	35041	24550
25.09	33059	36984	37590	38559	42916	40916	40109	32666	48017	49161	39218	43762	48522	50575	41024	38918	42662	37314	41284	27755	36990	50534	30117	23105
26.09	26615	39475	47077	42490	39121	38497	37117	30165	22728	31582	39913	37031	43358	32450	40356	35304	41204	32539	37261	39050	34087	39996	22813	22103
27.09	23962	27868	32952	37159	39526	38968	32462	25500	26058	33087	31370	25630	22441	23625	27634	31072	24653	27945	29479	28990	25352	31827	30042	20695
28.09	25546	27923	31700	26170	24854	30345	43836	30847	42550	45362	49088	38426	42329	41131	44710	38363	34310	47336	49253	51869	44667	33844	46926	33808
29.09	47447	45416	32085	49266	49162	48304	42720	48610	44400	55653	48223	46599	48842	36852	52606	40948	44291	37887	52081	53963	40124	43645	46213	33801
30.09	43917	42335	47170	54646	42711	41713	44945	43561	50440	44833	47401	47691	58979	50449	46324	41378	40316	55472	55007	36821	38167	41279	39185	35002
Усього	1 177 494	699	1 216	1 238	1 167	1 166	1 225	1 045	1 148	1 143	1 173	1 198	1 238	1 306	1 263	1 064	1 172	1 186	1 277	1 219	1 151	1 187	1 202	977
Середнє	39 250	957	40	41	38	38	40	34	38	38	39	39	41	43	42	35	39	39	42	40	38	39	40	32

кіль	к/сек	сек	к/сек	сек	к/сек	сек	к/сек	сек	к/сек
------	-------	-----	-------	-----	-------	-----	-------	-----	-------

ДОДАТОК Б



№ 101-к-21
виз 22.05.2024р.

АКТ

впровадження результатів науково-дослідної роботи

Даним актом стверджується, що результати науково-дослідної роботи ДБ05021 (Державний реєстраційний номер: 0121U113264) «Розвиток методів дослідження складних соціально-економічних систем на основі інтелектуальних технологій», кер. проф. Бакурова А.В., які отримані у НУ «Запорізька політехніка» впроваджено у діяльність підприємства ПрАТ Електрометалургійний завод «ДНІПРОСПЕЦСТАЛЬ» ім. А. М. Кузьміна у вигляді моделі аналітичної платформи для моніторингу еколого-економічних ризиків.

Розроблену модель аналітичної платформи використовують для візуалізації наступної інформації: абсолютного значення споживання електроенергії, кВт; абсолютного значення ринкової ціни на електроенергію; прогнозованого значення споживання електроенергії, кВт; прогнозованого значення ринкової ціни на електроенергію; відхилення прогнозованого від фактичного значення споживання електроенергії, кВт; ціни відхилення (ризик перевитрат за неточності прогнозу) прогнозованого та фактичного значення споживання електроенергії, кВт; ризик перевитрат грн.кВт-год; ризик перевитрат за неточності прогнозу; діаграма прогнозування абсолютного значення споживання електроенергії кВт.

Моніторинг еколого-економічних ризиків дозволяє автоматизувати роботу з даними та отримати точнішу вихідну інформацію для прийняття управлінських рішень щодо їх реалізації в межах підприємства в умовах різного завантаження обладнання внаслідок різної інтенсивності виробництва.

Голова Правління
ПрАТ «ДНІПРОСПЕЦСТАЛЬ»
Доктор технічних наук, доцент

Сергій КІЙКО



ЗАТВЕРДЖУЮ
 проректор з НР НУ «Запорізька політехніка»
 посада керівника навчальної організації (підприємства)

Вадим ШАЛОМЄЄВ

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

2025 р.

М.П.

АКТ

про впровадження результатів дисертації Юськів Олесі Ігорівни
 в навчальний процес НУ «Запорізька політехніка»

27 лютого 2025 р.

м. Запоріжжя

Склала комісія у складі:

Голови

Антон РЯБЕНКО

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

члени комісії

Дмитро ШИРОКОРАД, Еліна ТЕРЕЩЕНКО, Олександр ДЕНИСЕНКО

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Комісія провела роботу щодо визначення фактичного впровадження результатів дисертації Юськів Олесі Ігорівни «**Методи, моделі та інформаційна технологія аналізу енергозбереження металургійного підприємства**», виконаної у НУ «Запорізька політехніка» та установила, що результати вказаної роботи впроваджені в навчальний процес на кафедрі «Системний аналіз та обчислювальна математика» НУ «Запорізька політехніка»

Вид та об'єм впровадження.

Розроблено модель аналітичної платформи для моніторингу еколого-економічних ризиків, що дозволить отримати більш точну вихідну інформацію для прийняття управлінських рішень щодо їх впровадження в умовах різного навантаження обладнання у зв'язку з різною інтенсивністю виробництва.

Результати виконання цієї роботи впроваджено в якості прикладу на лекціях і під час виконання лабораторних робіт з курсів «Теорія прийняття рішень», «Аналіз часових рядів», «Інтелектуальні системи підтримки прийняття рішень» та «Моделювання соціально-економічних систем», а також як змістовна задача для курсового та дипломного проектування за спеціальністю 124 «Системний аналіз» для першого (бакалаврського), другого (магістерського) та третього (доктор філософії) рівнів навчання вищої освіти.

Голова комісії

[Signature]

Антон РЯБЕНКО

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Члени комісії

[Signature]

Дмитро ШИРОКОРАД

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

[Signature]

Еліна ТЕРЕЩЕНКО

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

[Signature]

Олександр ДЕНИСЕНКО

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

[Signature]

підпис

ДОДАТОК В

Кількість споживаної електроенергії, кВт

Рік	Місяць	Дата/час	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
2021	2	1	47821	64841	57825	46077	56911	57106	62432	39043	39306	42441	43720	45590	64081	49503	60247	55140	52049	39337	37983	47148	57366	46872	43613	30919
		2	48779	48830	36188	49599	62131	54208	44646	48929	46317	42576	47958	36731	46621	59007	49968	49635	52212	40983	40196	41934	42983	36525	37281	32953
		3	39720	40642	47432	44194	33754	37587	43500	47838	45730	51218	38770	56340	48238	49398	58368	45171	47693	64022	62260	49100	49898	56854	58157	44851
		4	45958	49218	51646	51625	48724	54624	53358	50512	46479	58181	50192	55336	44865	45372	59642	37983	45421	67735	61598	42670	46653	47424	40946	39410
		5	44980	50564	52265	50121	53888	52173	57408	48471	52473	56037	46640	41033	57360	52872	57492	62427	38686	39019	43396	45528	58889	49223	47489	44182
		6	62856	54699	47766	54753	55832	44949	44948	42731	54014	59136	47511	40665	41265	38495	50298	37771	51031	61548	51056	52956	53136	46739	51260	46969
		7	47924	49078	42168	44462	40517	51974	53780	52289	33313	47969	56333	63123	52745	43355	59545	46370	64815	44780	57182	64617	47009	47494	53414	47778
		8	45656	47325	35559	53753	46704	41638	55492	38259	56016	45696	39352	37646	48068	50010	60685	37858	45533	56891	56343	40966	47257	47052	51606	38885
		9	44818	39323	46006	55991	53265	44945	47202	50615	47354	39649	39372	40894	36861	43613	38237	30355	35614	42440	43611	35930	59464	51198	47029	40613
		10	49015	57212	37830	54790	49383	61247	42605	40637	53436	61620	43894	43949	40876	57435	64957	63802	59794	45430	50187	52930	57104	50591	47919	41221
		11	46725	52527	50293	43136	45177	56262	55320	37280	45218	39158	47096	49990	37018	41932	56854	53931	52615	54341	54024	42761	48171	40750	59545	39948
		12	46639	50082	38724	41965	39893	49812	44548	36570	33623	36706	29305	41259	35001	37812	47873	37036	51755	50779	42588	49944	47886	35565	42783	47631
		13	49541	50389	46752	57408	46296	45423	46714	41487	44300	43478	48100	58868	48006	42166	47292	47189	56021	46633	51914	61575	41737	53897	52414	48644
		14	44939	46972	44355	57712	43605	44386	47133	39813	41527	41866	55450	55019	50772	37842	41418	47423	50431	42596	45913	45765	49959	43859	32187	32720
		15	44921	46599	49711	50925	44517	49253	51370	40429	53681	43529	48479	47970	47987	55332	49115	48071	49437	50161	44491	51440	50493	47109	45809	41364
		16	45366	46108	45215	54262	48598	47469	56972	36002	47282	49391	48565	52209	45809	56504	56364	46583	34528	43739	53092	43320	49729	43866	48299	40613
		17	42160	50946	55206	44479	44778	46429	57742	47638	48375	41218	45806	57758	54482	48531	39402	48089	45616	51848	38308	44063	42337	53468	50617	30530
		18	34364	37130	47850	41547	51510	45375	48272	33715	46219	54174	41767	53298	50023	39779	45765	37824	31034	41123	33413	46445	37095	42020	30341	30642
		19	35774	39732	43662	31772	53568	48382	42037	42337	46068	51262	54108	51631	50608	55497	45289	51628	46321	43262	44681	57682	48643	44492	44654	36969
		20	32959	42094	51781	42582	35967	38037	31523	40023	40991	49020	43071	39908	51881	59177	55069	36708	42667	59639	57537	49729	56541	67846	46075	40884
		21	54892	53529	46310	41980	56692	53493	57439	56614	54576	45391	50241	50490	58803	61021	46018	41641	64719	52020	48051	53332	59061	45346	52483	34193
		22	44897	52090	42632	45280	52391	54311	39446	53918	55410	48872	48828	54959	51484	42426	36649	47085	61263	49748	49826	51517	54669	47300	39971	37223
		23	53534	49938	58357	49391	46204	54672	48313	57310	46499	37993	49650	55582	59201	49941	57089	52937	53528	53310	43867	47516	62384	58223	51588	37524
		24	47080	53952	46539	48892	47745	57584	45191	41989	46574	54813	49946	47679	48613	54146	60120	52734	52367	51622	54735	58401	39279	49715	48981	43598
		25	36535	40803	43836	39378	48429	48474	41218	44482	59549	48592	43979	41684	47718	46748	35989	41040	42728	55566	37395	46894	54116	38550	41868	35289
		26	44728	49042	38362	53432	56123	50139	43183	44262	52991	54769	43020	48018	48789	54153	41627	44735	47941	49463	57493	53082	47588	56795	49497	54194
		27	50497	33416	37758	58525	50135	54998	46195	41927	51937	44504	55368	53842	52372	53571	48642	50990	47239	51892	55157	64616	41756	54914	50562	45705
		28	46169	51488	55227	52295	48143	54852	42719	42936	43535	53035	50037	38841	47867	50118	37455	32213	38989	31038	50119	54914	54555	43861	48840	46017

Рік	Місяць	Дата/час	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
2021	7	1	30 093	36 026	34 716	57 238	38 102	34 508	36 363	37 953	30 56	45 159	48 006	55 755	42 147	48 082	46 138	38 672	49 152	47 554	45 747	39 019	41 075	45 663	45 710	28 876
		2	28 919	36 824	34 347	44 511	54 326	37 844	49 851	39 450	26 54	46 216	40 574	34 024	53 259	44 959	47 027	48 281	57 003	51 924	46 735	41 472	42 236	51 574	28 645	32 379
		3	35 398	40 135	45 096	33 545	29 776	42 770	31 672	36 929	28 02	35 235	39 530	53 187	40 051	34 997	46 407	37 359	44 563	39 976	58 469	43 105	36 091	47 316	45 762	39 243
		4	41 670	37 974	41 825	35 936	52 008	61 084	34 756	32 961	51 75	57 652	40 877	48 041	50 852	57 252	46 024	43 779	41 959	60 871	41 753	47 782	41 875	32 352	25 881	47 167
		5	43 682	37 270	46 472	30 340	51 400	33 506	32 425	28 874	29 39	35 795	33 329	31 695	36 489	36 806	33 847	31 957	38 788	28 244	49 992	39 094	36 556	41 074	47 785	40 070
		6	40 684	51 033	40 707	42 725	38 000	55 447	42 750	43 346	41 18	54 236	42 491	47 611	46 649	39 358	50 565	55 436	34 560	50 145	37 630	48 928	51 129	39 799	39 094	42 984
		7	35 247	44 925	47 913	49 651	41 705	34 808	33 807	37 657	34 25	36 306	31 920	29 290	39 476	38 932	50 484	35 814	33 872	40 919	44 526	43 056	44 588	44 763	40 454	34 996
		8	39 462	27 445	34 235	36 183	39 432	41 710	38 672	46 191	49 37	35 830	28 939	45 008	53 566	44 650	33 817	36 099	43 648	54 583	40 509	45 559	41 137	47 549	44 859	21 212
		9	27 325	42 898	53 813	49 165	39 238	55 041	47 406	28 981	46 95	31 946	36 538	42 419	47 988	47 136	43 611	39 759	51 085	45 190	45 787	41 859	48 967	44 249	44 920	49 123
		10	46 668	41 784	36 903	38 305	55 904	44 814	51 338	45 546	33 09	34 063	41 300	43 249	48 640	39 994	45 967	43 282	42 276	38 752	51 631	46 504	48 979	36 014	47 026	34 171
		11	41 176	36 683	42 181	53 754	46 267	40 188	43 515	41 641	43 27	55 255	47 765	45 689	43 331	54 702	42 822	38 496	45 662	42 450	51 625	38 914	43 499	53 737	42 165	33 319
		12	39 059	45 669	40 062	42 559	55 421	45 152	31 908	31 684	48 58	50 821	41 330	53 859	56 671	52 706	50 123	37 083	52 863	55 952	50 320	42 480	58 519	44 443	45 732	54 438
		13	41 448	50 178	34 057	48 666	52 291	51 330	46 063	50 665	45 38	51 928	42 539	49 019	45 790	52 886	50 569	37 886	40 522	47 146	38 823	36 103	49 639	49 325	35 514	42 294
		14	33 898	51 669	50 300	53 472	56 063	51 954	50 198	38 879	36 33	32 071	35 615	35 818	24 647	29 914	36 529	33 917	31 676	54 071	52 126	46 502	39 341	48 164	41 125	36 293
		15	38 915	54 406	45 661	47 917	45 366	40 729	58 987	49 949	40 90	48 431	59 021	51 841	44 076	46 029	48 299	45 410	53 216	44 393	47 300	34 687	44 402	60 655	50 238	28 989
		16	36 375	37 853	50 067	45 828	35 806	48 836	53 287	45 779	43 98	42 542	47 319	39 069	58 742	36 917	46 444	51 082	37 178	38 516	39 159	51 147	49 528	42 741	32 292	32 953
		17	31 345	51 118	52 770	40 230	39 218	44 534	43 218	32 558	32 17	41 486	47 612	52 031	46 917	38 328	37 697	41 050	38 156	51 200	34 516	49 642	46 374	44 167	37 470	34 399
		18	32 988	43 514	45 627	33 548	37 359	47 601	35 024	26 125	45 05	47 859	39 858	45 336	47 215	47 572	40 657	44 369	40 862	51 447	46 072	36 435	28 615	31 827	27 139	21 376
		19	25 152	29 831	30 560	36 085	38 373	31 455	29 819	34 406	38 00	41 530	43 754	53 042	39 475	39 373	37 655	41 754	54 697	41 916	45 832	45 336	40 022	44 718	44 115	42 060
		20	34 344	37 078	44 248	42 960	32 679	35 032	39 491	26 702	39 96	36 215	51 201	38 057	39 231	46 306	44 648	45 888	50 926	39 863	39 088	35 775	50 793	32 225	24 453	43 428
		21	39 354	38 120	29 730	45 683	49 413	41 186	35 762	32 846	42 58	41 575	32 994	38 654	45 798	44 548	53 663	52 919	47 938	36 152	44 731	35 310	37 902	28 930	36 160	32 110
		22	41 986	40 989	36 281	29 153	35 985	38 889	39 269	30 919	34 66	31 852	41 054	31 140	43 724	47 921	37 049	27 668	38 584	33 285	33 114	31 582	31 489	36 625	41 078	34 620
		23	33 906	33 993	28 554	42 645	34 679	31 147	38 442	29 526	33 66	36 585	27 726	36 873	30 658	37 118	41 575	38 857	39 045	34 525	39 221	38 165	48 538	40 485	34 652	33 144
		24	41 768	40 038	41 831	50 468	45 751	49 971	45 223	32 888	39 15	30 393	43 030	32 185	41 662	42 310	38 102	26 218	37 203	46 048	35 938	39 614	40 772	40 362	44 052	29 105
		25	38 438	31 545	37 714	38 628	33 672	46 405	35 845	37 873	33 75	35 196	33 101	30 752	30 459	41 499	52 986	37 758	45 824	47 368	50 401	36 585	39 491	43 753	35 586	32 823
		26	28 732	37 807	46 273	37 668	32 011	41 647	42 527	26 870	27 87	42 709	40 824	46 163	44 593	51 750	35 973	45 979	40 345	49 969	45 053	44 858	43 607	46 231	42 645	29 771
		27	43 886	45 107	46 157	39 087	27 771	39 156	36 475	44 469	35 29	48 428	41 003	30 150	60 990	47 819	44 197	26 077	35 876	39 145	41 771	36 072	32 804	31 598	47 103	34 546
		28	27 671	32 803	50 532	46 916	46 316	44 353	34 463	40 925	44 37	47 707	55 757	40 730	41 472	46 586	55 415	39 817	36 656	38 513	31 910	30 882	40 378	41 833	36 402	33 512
		29	46 959	42 228	39 522	38 507	35 743	41 967	49 803	51 498	38 01	41 707	33 749	28 778	36 811	39 209	38 366	28 752	32 152	28 822	32 631	23 522	26 076	21 998	30 215	22 578
		30	39 344	31 048	39 155	47 089	33 905	44 110	44 866	32 865	39 57	40 822	27 471	28 763	34 435	25 342	31 226	23 212	27 715	26 751	32 472	23 184	23 570	26 787	33 474	27 611
		31	34 205	32 530	37 774	35 133	34 198	32 733	24 535	23 658	28 57	25 804	32 747	33 811	29 253	28 163	36 368	27 454	31 719	33 629	26 004	26 514	31 113	23 851	25 571	39 551

Рік	Місяць	Дата/час	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
2020	2	1	43 287	45 061	47 857	41 078	38 192	47 261	51 125	37 363	35 610	42 055	46 583	49 728	50 274	41 450	55 853	39 465	51 725	44 845	36 626	55 810	53 003	54 499	36 510	30 665
		2	35 729	45 009	49 156	48 025	37 134	33 187	32 273	31 103	44 223	43 820	36 280	44 684	40 976	42 264	35 659	27 232	34 789	30 150	34 174	22 146	28 168	27 695	31 154	28 806
		3	30 262	29 691	27 954	37 183	30 451	32 175	26 502	30 944	22 900	22 064	33 735	38 227	26 936	34 492	33 259	32 629	29 555	25 091	34 997	33 908	32 005	25 904	34 795	26 338
		4	25 698	33 949	24 908	26 513	34 906	30 170	33 604	29 132	27 402	32 040	32 648	30 281	33 474	31 444	33 680	23 890	26 836	28 306	30 370	20 702	23 269	33 239	30 878	31 170
		5	22 712	27 506	36 474	30 440	30 299	30 736	25 201	33 680	36 421	29 857	28 143	41 155	39 399	37 655	31 453	32 252	41 151	34 429	35 300	26 583	36 407	32 906	34 161	21 262
		6	28 876	33 681	30 450	26 948	25 754	33 675	26 663	25 324	37 465	31 873	29 512	31 444	40 486	45 904	47 492	50 144	55 213	41 613	56 882	54 350	43 725	40 863	39 836	28 110
		7	35 629	45 974	50 625	48 061	40 531	38 669	55 018	47 309	46 455	40 878	50 500	44 426	33 482	60 470	55 859	44 535	53 088	42 572	48 012	54 448	50 523	45 615	40 856	33 213
		8	42 990	44 408	44 045	45 895	41 237	55 335	43 269	45 594	41 284	47 291	55 838	59 136	46 304	49 076	39 053	60 460	49 818	40 406	35 822	63 029	51 445	56 550	41 218	42 086
		9	50 894	57 080	59 483	38 786	43 010	47 948	50 304	48 391	42 070	48 772	46 777	55 024	53 161	53 012	53 460	35 731	43 524	47 882	39 751	37 716	38 210	38 662	45 887	42 674
		10	50 812	44 889	51 054	42 346	46 307	43 504	41 098	53 713	40 903	45 064	40 507	57 578	51 330	51 350	36 699	39 724	48 585	61 257	52 007	51 057	44 089	45 433	38 354	47 547
		11	41 412	57 301	46 734	48 104	49 956	48 214	48 309	33 681	39 665	46 674	33 026	37 534	49 394	41 978	39 425	41 615	54 104	55 450	54 087	43 824	39 990	48 923	51 225	44 139
		12	40 189	49 449	51 650	55 306	47 601	43 789	55 152	52 365	41 280	59 205	60 686	52 711	51 738	39 025	54 760	46 400	45 489	44 022	58 664	51 364	64 587	36 791	50 688	38 041
		13	53 045	52 838	49 499	46 894	49 468	42 663	46 315	32 012	33 364	38 148	30 311	34 774	38 725	35 928	38 504	36 435	55 919	53 298	50 581	42 805	52 979	46 126	47 534	41 304
		14	39 890	41 922	35 501	52 183	44 938	54 431	53 243	43 938	49 785	52 729	59 137	43 557	37 917	41 029	47 478	40 182	31 438	45 908	48 595	53 627	43 528	35 134	45 133	52 947
		15	49 010	43 672	49 789	61 104	48 975	49 482	54 588	58 527	52 281	43 014	62 887	55 044	36 235	50 707	52 797	44 249	40 976	38 104	38 549	58 389	55 729	51 620	44 643	39 228
		16	56 006	49 300	54 254	53 860	40 894	47 713	51 155	26 489	40 093	39 430	49 368	40 443	49 694	51 322	56 832	38 038	49 113	53 999	52 713	49 456	54 167	45 976	48 190	38 046
		17	49 682	47 708	57 836	61 174	47 843	57 969	61 587	41 437	47 517	52 356	54 192	51 588	53 838	48 444	51 593	35 753	50 735	44 891	59 881	51 671	51 327	64 806	55 455	42 885
		18	46 518	46 617	53 821	49 663	45 407	38 263	42 214	35 548	45 886	56 733	44 793	37 878	48 581	47 821	47 006	46 756	37 400	45 340	42 897	47 759	56 680	56 733	41 613	38 072
		19	50 475	53 949	44 062	52 582	53 931	51 237	49 881	41 954	54 329	54 730	42 951	48 223	54 600	36 449	50 962	57 853	51 610	34 632	55 271	57 115	47 438	45 761	46 137	49 670
		20	52 656	42 619	51 839	41 151	52 496	48 648	48 031	43 615	44 937	48 256	55 754	48 942	48 179	47 741	45 521	43 428	50 459	50 646	49 803	61 042	38 274	49 857	59 469	37 799
		21	45 390	47 350	53 446	40 121	38 983	47 388	43 835	43 538	49 419	53 281	46 646	37 096	48 448	39 495	49 929	46 301	49 595	48 454	48 286	57 070	41 936	46 328	44 464	38 914
		22	43 974	39 405	44 280	56 268	43 105	42 476	36 950	45 277	57 104	52 803	63 232	42 482	59 028	53 205	66 376	44 967	61 112	56 199	57 993	60 900	46 881	57 905	43 162	33 979
		23	45 743	55 567	48 157	40 435	40 522	49 719	43 890	45 860	54 575	51 057	62 749	59 730	43 573	52 033	58 210	41 420	41 261	58 945	52 039	44 583	38 303	43 503	43 907	39 711
		24	55 875	53 314	35 488	50 455	45 092	58 884	49 407	39 741	53 245	56 720	52 986	47 017	62 668	57 880	45 655	50 663	49 711	48 136	48 229	49 302	49 090	45 516	55 286	46 165
		25	45 711	36 580	54 400	56 653	50 598	54 733	56 937	36 698	49 341	60 527	51 951	44 304	40 145	49 169	43 801	28 171	49 481	50 652	47 862	48 715	49 030	47 264	48 301	40 996
		26	41 698	37 124	46 212	55 580	47 268	44 300	40 867	37 514	30 429	40 230	39 875	44 669	46 220	58 842	42 413	50 784	46 591	48 456	53 717	41 253	44 120	40 668	40 810	33 671
		27	37 862	47 872	40 413	48 640	54 193	51 647	49 391	49 265	45 030	36 694	49 744	57 658	42 893	48 427	55 169	39 416	40 290	44 433	47 550	41 741	55 714	48 564	44 678	49 830
		28	39 013	54 328	52 271	46 098	46 207	35 891	46 610	37 343	48 134	48 990	41 437	39 443	53 726	50 427	47 916	41 886	42 318	52 730	41 957	45 331	53 409	41 580	39 176	29 520
		29	41 266	39 245	48 003	51 560	32 220	32 386	35 712	33 810	47 637	54 214	43 198	34 850	44 162	43 007	40 101	32 930	46 043	58 148	49 757	48 325	51 298	59 776	48 444	36 335

Рік	Місяць	Дата/час	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
2020	7	1	38645	47342	44963	51073	50476	43088	36026	33331	36322	29509	28719	31770	31952	28066	22849	27251	41046	43334	42089	26305	42431	48591	40588	27613
		2	40895	45748	54511	51471	44551	37436	49918	44945	40793	39802	46186	36211	48534	51205	32108	30456	41581	48349	52048	48868	29416	36339	42020	42006
		3	43512	44344	39934	53093	32423	36347	50454	41383	39283	47783	36689	34586	51780	39070	40543	39991	35371	40291	35596	54155	38757	37919	44305	41920
		4	53725	39777	40135	35550	38256	44465	41365	30551	35362	40694	34096	45870	32917	38045	29244	33931	39186	39149	46898	42806	50017	44427	42041	38677
		5	39043	33186	56435	48088	38679	35069	65838	32117	43753	44835	48846	44337	42615	43592	51393	42207	41200	38526	42874	48326	47151	40269	33588	31371
		6	38627	43926	40304	31408	49077	33922	43789	37567	44134	47712	32370	50790	49502	45720	48260	42244	43400	38173	55610	51670	30824	44249	53849	45470
		7	48686	30981	48589	41154	41403	47962	44726	37048	27702	31733	38759	36388	35812	40316	36204	37730	40522	44953	43991	33506	31365	32112	43812	33238
		8	54478	34915	35193	46796	35441	40524	29203	42490	43976	40143	42771	45549	44027	38619	37994	26585	35487	34923	43930	48185	36194	38896	59282	32683
		9	44893	43423	42421	42148	37026	53154	35469	39693	45793	41241	47298	50909	35712	51266	47177	35113	32809	31211	38405	32761	36832	43529	38523	28190
		10	36189	37486	31826	32114	37154	33099	43877	40038	48246	34021	37869	46323	47347	44710	36308	33663	36028	43683	41816	31141	43489	40895	45936	35735
		11	35992	28516	45072	42155	49177	37913	37178	29426	33409	37243	40251	33162	29978	25008	45363	31550	41629	46495	41942	40880	40007	48562	37489	30657
		12	46324	41194	44552	34168	46365	43138	39317	33761	43333	40694	35498	38399	33601	44685	36291	40659	39156	41192	36407	42176	46056	36418	37820	28686
		13	42740	41538	38771	42033	29808	43942	28345	34910	41500	31445	38574	32557	36770	34142	41942	32664	32155	41432	46420	46424	36896	28077	39587	26464
		14	24481	26656	35630	44743	32076	38163	29799	26128	38401	40654	41620	42279	32964	36835	41186	32253	42416	38256	41631	37379	43969	36203	39236	30675
		15	43690	36947	37475	46411	41934	37424	37777	32788	34963	34506	34941	28577	22788	22265	28116	30228	38698	35955	42363	34128	38635	33845	41297	39043
		16	46196	44798	38723	35593	44633	53779	37422	38149	43373	43078	42419	37732	33029	45528	37668	34362	27135	45700	35511	37833	36968	45624	35100	27408
		17	38236	32478	33869	45211	33204	43358	44427	39946	43514	47203	38124	51838	48319	45424	36036	30652	33297	40963	41908	36673	28838	40165	30143	41396
		18	55183	41124	53909	50680	39644	42839	48555	33862	41620	47221	54621	35995	35404	39230	34533	39868	35123	34126	36625	54518	39837	44051	31610	36006
		19	39306	25807	44431	38805	37951	35736	44263	49860	44940	43382	44252	49258	43467	37651	55011	46527	37582	38572	43086	46158	39376	47406	39234	36007
		20	39555	35692	42181	44912	56236	41545	43940	42897	44964	49776	36836	45134	41733	37102	42208	32374	36104	36593	46836	48428	45366	31720	43485	24766
		21	35712	39497	41165	37114	45748	36672	47853	41868	49331	46047	46793	45338	39318	43688	36771	45009	47915	41328	39180	28370	46683	38422	33775	26587
		22	31417	45346	39535	44788	36415	38502	42376	39718	40058	32993	36172	47672	44444	40475	34937	35665	46570	42032	38999	43327	43622	49123	49438	39765
		23	41613	42964	52753	44822	40674	34020	49201	44476	47710	39373	45530	40962	49432	52334	42875	37545	56825	52582	44600	39134	43684	35988	46689	20643
		24	44837	38840	41004	42251	39178	30616	29372	39560	47146	40895	31868	40197	36055	35212	45302	35210	31377	36125	41286	30894	41163	36739	36105	23805
		25	30360	27443	39642	28526	20546	23201	41294	35472	34919	38418	39444	35446	31566	36408	47896	38229	46631	47405	44650	45292	46299	45737	38136	31757
		26	40562	46721	48409	48187	41361	41515	49008	42039	46569	53928	59538	56642	51512	54178	47363	32437	49254	52464	45851	30210	43246	47824	48005	35331
		27	45176	44062	54895	53244	44589	49325	48977	37659	27338	33241	50323	43868	37924	37795	42060	45068	31454	35320	52575	48338	54403	47603	39512	42192
		28	41683	39766	55875	51765	42080	46223	52475	46380	44396	57778	56669	48256	42695	47000	43862	47367	49705	55177	35568	47582	51022	50054	47065	35881
		29	42328	40367	43340	53232	51486	47204	49477	49377	41764	44198	41702	38731	58122	49394	48723	45511	36399	36006	42079	45512	50674	50257	41608	36712
		30	35816	36397	37367	47901	51772	42994	39489	39134	42485	54586	46727	47703	51471	44787	38437	32629	51969	60720	56715	49229	43840	50087	28515	22996
		31	33491	40588	36726	31761	39872	37903	38883	31685	38223	37531	30589	32032	26787	26606	41564	48289	41586	36642	38409	48344	43419	35496	40072	33185

Рік	Місяць	Дата/час	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
2019	2	1	39429	36287	31144	44647	44930	40471	33031	36419	35041	42690	36416	33334	38679	33006	32509	31059	37681	42006	51002	43035	35049	44610	42040	45999
		2	30544	33312	39284	41735	47229	34998	39478	33502	34421	44532	48806	35749	36559	41916	40017	39817	42982	39654	38686	40982	39487	49484	48519	37965
		3	32143	43220	45784	44067	40405	32765	41335	41830	41820	39871	34275	30798	44358	51196	41067	30895	35862	35454	31620	40402	30646	50783	50121	37508
		4	33721	35164	38199	52065	40562	36556	38513	33334	44283	35639	36724	37580	42655	36609	47703	35239	37772	30455	41017	36525	33353	43785	34762	34320
		5	33983	49504	41980	38015	50106	44899	48223	40239	33016	39084	51397	54863	52650	53212	42664	50449	58049	51646	42486	68038	53234	47125	40669	33395
		6	39979	58921	51569	50897	42674	51867	52747	46279	40277	53296	62752	56344	54255	52386	53137	47438	47094	37804	36917	40788	35123	49111	47447	45504
		7	55684	43248	48243	47174	49253	52751	55401	48277	58915	59149	42464	56666	52583	64212	57817	47966	33316	35373	48646	44906	51230	50921	31204	42549
		8	53169	62717	55582	41783	47584	43923	43427	33351	42872	51170	55302	43379	40544	48952	53336	39693	37610	40279	44646	47150	62429	57301	43259	49720
		9	48827	47041	48654	55563	38066	54028	51119	49596	42437	39413	41930	51184	59294	43671	38902	38811	43185	57652	52161	52108	44366	53615	42004	38256
		10	38910	41872	40543	45768	44321	39493	40468	41794	42824	50916	46372	37145	39786	42277	38238	36540	40223	38824	47752	53061	52760	51542	40566	41395
		11	52397	42194	50859	41887	49254	38908	58264	47799	53897	43416	37402	42962	54515	57894	46106	38091	31748	39208	50976	44217	38621	46459	50569	52195
		12	52852	42334	53494	52788	62365	45803	38492	40444	31532	50298	39929	45164	39687	33156	62504	40664	48678	53956	45803	40590	49717	62489	47990	37574
		13	51272	58476	54666	48940	32927	51017	52919	52560	46323	37221	38813	46661	42122	37766	47149	36549	46575	54602	63324	38793	34336	37599	40850	41902
		14	34790	44822	51660	54715	43632	41762	48622	52294	47440	45679	26670	25194	38116	34783	35158	31582	29004	35624	36885	28856	34613	36304	32185	26958
		15	26793	31004	33589	29865	28128	32589	42760	33513	58145	57352	40647	29054	52015	49204	49249	42684	34722	44851	54457	45814	45755	52195	52094	36206
		16	47910	59045	64592	41707	48414	44637	55367	43628	43652	49791	37976	42119	48910	56829	49364	38485	53153	54172	62690	43546	45618	56568	53411	36216
		17	47294	46741	41245	34940	37009	56021	47845	38844	53464	48043	44825	48053	58254	52513	47452	48290	35886	51875	32866	48728	43670	48200	43809	33017
		18	57109	59506	54656	49667	57188	52796	46398	39809	53204	47285	54493	52776	39638	44678	49012	49731	45538	42112	39164	41097	55270	31419	36217	34801
		19	53719	55195	46275	40218	58216	57240	48610	31718	34196	44895	44603	49624	46879	41570	38472	43278	46795	29977	39839	41931	42201	31157	43180	50289
		20	53828	36155	40670	57138	46999	51575	50451	49880	46458	51269	43383	33492	34558	43809	39242	33700	38071	36477	47391	50616	40299	42639	39023	38396
		21	35286	28504	30740	33167	41474	44395	39846	30211	27978	46498	54797	52563	46600	47542	43232	46255	43221	51771	39485	46008	50814	47731	43523	30871
		22	52765	50047	42946	46573	49797	43765	53300	35306	38875	57761	52094	52638	37136	50985	57042	50603	49173	49699	45789	45247	47252	51540	49572	30765
		23	44956	49542	36560	47196	37366	41742	53170	47529	52489	48561	47180	42134	39245	53026	49188	35604	39834	57393	52220	45917	38344	42315	43595	40446
		24	47128	44352	49468	39506	46991	51712	50432	47649	57206	50728	48963	46496	58107	51030	45203	36444	50141	48882	53074	40585	42385	38400	45519	38061
		25	41932	47735	45450	42286	42053	49586	47708	38861	37246	36833	47600	40607	43415	48456	32192	38285	46845	44994	52096	47833	52007	48427	54453	39921
		26	44684	56801	55885	38975	44348	46227	46950	30171	45849	49071	54144	49144	37559	48831	56779	41805	30145	40085	49540	40393	55220	44602	41810	39451
		27	46535	40282	29833	38137	44784	42537	52221	39792	51495	36700	48023	44395	56462	50388	45486	43927	41051	46786	53651	42436	53170	52704	40366	36675
		28	36787	31675	41334	37157	34424	34801	28852	26292	32019	35339	35888	38293	49800	41215	46398	40859	46304	42877	52855	51352	54381	50804	43814	36920

Рік	Місяць	Дата/час	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
2019	7	1	36 388	41 779	49 911	43 635	44 731	45 722	28 558	37 020	38 212	45 843	41 973	37 197	41 865	41 538	45 962	36 802	40 122	41 432	51 958	46 229	42 403	39 174	47 190	40 085
		2	47 770	43 581	57 935	42 039	38 095	32 183	35 806	25 495	26 296	36 623	37 573	36 291	30 437	29 150	25 317	27 342	28 619	27 449	32 051	25 464	24 429	28 949	38 801	35 186
		3	42 559	48 238	36 692	45 822	56 402	47 022	49 801	33 509	31 342	44 685	43 665	38 449	41 123	43 707	43 289	32 740	37 494	42 636	42 642	33 541	35 191	36 249	36 702	33 498
		4	43 131	46 014	47 483	54 571	51 736	37 602	58 858	38 287	47 302	46 496	33 274	32 865	53 410	50 680	46 179	46 839	44 992	40 715	40 875	42 289	39 028	37 513	43 808	36 928
		5	29 894	41 903	38 579	47 930	46 570	49 062	47 489	43 187	52 620	53 036	56 723	44 482	43 899	51 182	51 248	41 031	41 460	36 308	39 814	52 362	32 119	24 746	34 163	45 134
		6	39 474	39 240	45 119	44 215	34 433	34 568	29 776	32 578	39 071	40 510	41 297	50 543	53 771	41 400	40 625	43 750	56 001	35 047	32 548	44 556	43 880	44 245	43 966	27 932
		7	24 015	30 771	52 446	45 607	40 132	35 523	41 880	47 704	48 518	38 168	37 073	41 420	38 020	49 847	43 064	28 146	39 064	43 895	46 858	37 814	40 870	45 231	42 371	45 617
		8	39 968	50 357	47 342	38 785	48 912	52 130	39 447	34 545	54 188	53 731	40 789	54 149	42 953	53 725	45 454	44 589	44 831	40 977	47 678	43 541	47 823	28 175	28 206	39 986
		9	45 375	49 852	44 988	34 258	43 193	55 186	49 744	36 449	40 830	49 925	46 523	50 147	38 956	39 039	40 455	40 088	32 618	37 068	39 070	39 766	53 302	58 291	34 391	27 317
		10	43 293	46 420	40 326	34 068	36 381	40 824	52 751	37 136	41 679	30 095	39 905	39 415	42 774	40 406	34 146	40 421	42 631	43 610	46 171	37 554	36 263	43 685	35 931	39 794
		11	39 638	27 231	36 323	48 697	42 611	41 095	40 271	37 447	43 611	37 892	42 353	39 244	39 078	40 790	48 506	38 673	34 316	28 259	43 701	37 183	38 654	49 002	44 886	36 881
		12	51 174	38 406	45 262	27 585	37 959	44 351	39 777	27 182	34 604	39 522	37 012	40 162	45 017	32 502	34 857	24 627	49 719	44 460	47 730	27 756	43 174	44 539	34 924	30 489
		13	24 778	23 772	35 963	37 992	44 317	37 807	27 289	27 854	42 701	37 655	54 088	41 574	35 755	38 061	43 983	39 111	30 890	39 439	50 878	53 214	33 514	48 970	41 884	28 780
		14	45 979	64 648	48 348	41 311	41 111	47 336	29 856	37 687	49 068	50 492	42 052	51 154	39 108	48 664	43 958	42 898	36 911	44 455	42 206	48 843	44 691	44 786	42 150	40 320
		15	50 524	43 263	47 506	54 503	44 775	33 875	53 389	45 080	40 993	41 393	47 953	47 358	53 058	41 751	51 396	40 124	41 911	34 319	37 390	41 570	41 128	39 996	38 070	38 018
		16	44 670	34 280	38 581	49 562	45 537	55 301	43 360	40 753	39 955	40 615	37 179	49 781	51 289	49 919	43 199	39 551	46 489	33 460	35 733	39 791	42 556	39 352	36 662	35 136
		17	47 294	46 741	41 245	34 940	37 009	56 021	47 845	38 844	53 464	48 043	44 825	38 053	58 254	52 513	47 452	48 290	35 886	51 875	32 866	59 728	43 670	48 200	53 809	33 017
		18	48 851	42 643	34 292	34 329	35 738	33 898	30 470	21 683	30 585	37 334	37 462	25 358	34 461	34 392	28 113	24 599	24 455	31 571	35 885	25 086	20 203	28 978	28 242	26 174
		19	26 324	25 205	24 124	23 944	31 747	29 259	24 616	22 343	21 046	27 241	32 474	31 862	42 716	43 138	40 722	40 199	42 867	46 473	27 333	29 556	26 163	34 196	42 636	37 670
		20	41 832	49 548	41 013	38 316	34 682	34 569	54 533	38 536	55 206	37 526	40 277	56 918	40 708	40 488	54 206	32 776	51 960	38 996	54 271	41 592	37 464	31 009	49 526	39 580
		21	56 774	50 216	52 065	43 993	42 377	53 635	43 090	54 533	48 543	44 446	37 948	45 829	53 839	41 830	38 372	37 670	53 388	36 350	41 182	49 127	29 919	35 753	43 971	38 262
		22	37 656	33 861	51 945	47 186	40 656	39 489	37 789	41 749	39 026	29 350	38 735	47 874	46 015	47 341	46 506	35 030	46 258	45 606	39 665	54 858	40 529	35 803	32 117	35 903
		23	39 446	47 145	43 832	52 152	41 084	36 400	41 309	37 482	49 915	40 056	45 642	44 188	47 874	46 915	47 080	35 081	29 598	47 014	50 749	33 008	31 197	28 070	24 518	40 849
		24	44 471	44 128	30 680	36 417	32 970	35 979	29 471	22 245	25 845	23 397	27 073	32 215	44 524	45 310	46 976	43 261	57 102	43 004	38 985	47 378	43 429	38 253	35 769	43 004
		25	41 216	45 535	36 687	43 745	48 716	42 475	44 808	38 535	42 076	39 818	57 262	39 511	50 902	40 768	46 830	40 860	40 622	41 650	49 187	33 347	35 745	36 841	36 426	44 375
		26	42 784	48 947	54 723	49 953	48 503	58 769	51 044	43 365	37 254	47 898	46 735	46 119	31 316	37 577	45 743	43 833	51 401	43 496	36 427	50 608	42 117	34 397	40 663	29 994
		27	38 035	44 051	50 296	49 622	46 220	44 595	49 192	34 677	38 278	28 090	41 805	55 493	53 238	44 308	37 393	40 159	35 095	54 106	38 447	31 514	35 616	38 565	41 377	44 800
		28	50 509	54 699	58 938	48 220	43 475	52 846	54 437	40 544	34 468	35 475	45 244	37 326	44 253	46 347	45 663	46 279	44 573	33 534	33 743	38 109	31 641	32 288	21 580	36 549
		29	50 698	47 635	51 806	38 471	29 955	32 271	31 448	32 532	27 977	41 059	34 630	29 791	32 602	37 174	38 972	37 789	32 747	44 904	47 822	41 237	43 598	36 439	46 161	32 374
		30	34 789	41 745	36 485	42 798	41 917	36 225	39 789	36 463	40 415	50 946	36 892	46 588	52 146	49 075	38 504	37 381	36 268	30 264	35 683	39 487	35 288	33 706	43 524	27 658
		31	31 487	31 483	47 037	45 007	39 751	46 616	39 659	32 870	35 956	34 836	32 786	34 583	41 446	47 879	41 871	34 683	32 263	42 149	37 958	47 668	46 268	45 424	39 157	35 184

Рік	Місяць	Дата/час	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
2018	2	1	39860	47539	49083	49598	48987	52110	53907	42687	46697	37011	41257	33612	40021	41332	42148	45892	54900	55841	52778	49897	61765	58178	45925	57503
		2	52738	56694	46837	52101	57312	63707	61708	55639	43064	61435	54089	50923	50582	58021	63473	60323	42964	46277	45903	65661	58450	49966	55113	43738
		3	55966	51376	54166	54525	52349	62602	57342	57583	45761	48547	57457	57756	51602	53863	67642	55306	50871	42771	57403	53279	50466	33642	50059	46200
		4	53530	44630	57962	64786	62453	41083	56697	60332	61202	52317	50787	46832	64227	48989	49130	54072	54314	51301	63257	57247	47848	37255	41347	53447
		5	53510	51237	58065	56524	49994	40351	41667	52818	46349	49225	46323	56903	66979	58567	59222	38209	46790	57390	52837	52663	40920	44195	41655	47800
		6	40232	51062	60982	55549	53130	64843	58861	46073	41226	50156	54644	60551	60342	49957	49630	45854	45255	37090	37026	44287	48064	56756	61071	54074
		7	46478	54436	62199	51723	46028	49828	46606	42118	62214	41390	46606	46456	58371	56272	51470	49223	62984	63422	54400	47798	59616	63693	51244	46417
		8	53512	54712	63852	51653	50736	54845	60252	42877	51656	50840	52671	38634	44200	64726	66197	47850	44803	60630	72008	47908	53791	59087	53739	48689
		9	56977	51481	65553	61260	46152	47255	50387	57237	58253	56930	55766	69102	61333	59418	52836	56544	59363	62966	52969	55564	65894	53468	50926	40826
		10	49915	64393	52665	56266	63914	52575	49405	48743	59554	57198	48479	57198	54294	59960	55985	57736	51225	52219	57282	57056	55874	58978	44286	47426
		11	43425	47866	59676	61471	50670	56768	53122	56958	44495	48389	49001	37807	56778	55811	65251	53274	53711	49747	73791	48451	48977	63930	57261	37875
		12	43425	47866	59676	61471	50670	56768	53122	56958	44495	48389	49001	37807	56778	55811	65251	53274	53711	49747	73791	48451	48977	63930	57261	37875
		13	46478	54436	62199	51723	46028	49828	46606	42118	62214	41390	46606	46456	58371	56272	51470	49223	62984	63422	54400	47798	59616	63693	51244	46417
		14	57167	50856	67896	48790	61020	61883	57410	56712	52392	42406	50655	56473	64010	61383	52910	57670	45701	52896	67591	57332	59072	53976	48221	39689
		15	52901	55663	67200	47037	55329	58364	54881	47467	52655	49617	48598	54323	48356	66570	67417	45507	59361	56899	60601	59832	45754	55767	45973	47217
		16	39479	39614	41638	53529	66564	60194	54625	45879	47975	45966	31982	31767	34286	35260	41924	40012	46266	50127	52448	68858	60426	52181	58481	51713
		17	58495	50697	46545	61396	52195	48006	42223	53326	59306	52092	46222	57647	68052	57521	47724	45650	57599	49838	47107	46013	46815	53293	49760	37417
		18	54818	64645	48713	50222	57004	57386	55709	52452	54490	57943	53296	59892	61019	69200	50397	53782	55373	56523	57024	50049	49652	64498	58824	35647
		19	54888	60229	54471	56138	47902	59191	57754	50824	51264	36860	40139	50459	57859	61356	44346	35497	48473	57044	50854	58113	52095	59173	64732	33751
		20	54256	68384	58967	62333	45955	68306	68106	53835	45494	38534	41428	54288	47188	55204	57931	54501	53717	50619	53371	63880	68163	47723	51687	51267
		21	45527	73678	55967	50490	48032	53067	64387	43980	50036	67335	68143	58767	54566	51355	49713	61502	59706	54334	50691	49910	67682	55394	45841	55067
		22	57968	67292	47714	59303	53932	59467	44463	38416	48458	50507	59525	50626	57176	54134	59311	54968	59033	61693	48172	42419	36685	57535	51056	48042
		23	44421	40699	57300	52980	49443	45617	36080	45645	41716	52192	48604	47098	42292	58539	54220	48143	69774	64200	67774	53654	50202	65256	55947	59389
		24	59684	52489	62957	47888	71604	55420	61265	60870	46696	62009	62579	61770	55219	55692	37037	50269	47217	57611	51907	51754	43823	48420	47228	50384
		25	45811	60526	52264	44390	57464	61695	62561	50815	49850	45622	50710	66207	63381	59126	52647	46748	57554	55487	67545	55157	58608	52262	59118	50264
		26	53069	59169	64724	49856	54944	59664	65402	39169	57708	56482	64698	51754	58934	50051	45088	57539	46170	62326	52320	46714	59013	65714	52757	55781
		27	45097	56986	59196	59524	57804	48119	47085	43078	37555	51709	40123	35708	48786	43059	44897	50192	43612	56159	48016	44218	48884	49070	52049	48177
		28	59307	57810	44741	51536	55275	65084	57959	52257	50292	54069	38276	54087	53421	46355	39611	57239	56133	60513	51875	50261	48627	50021	47575	33809

Рік	Місяць	Дата/час	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
2018	7	1	35284	37687	51332	39761	38180	42312	38426	31163	19280	24056	24287	40685	46131	40151	34538	23887	38853	34651	43906	44515	33074	30045	31585	50835
		2	52329	41262	41122	49676	42824	28565	48343	37121	43634	34387	34077	30312	33745	32269	28052	21226	23750	30337	28323	23674	29749	26624	31619	23611
		3	21489	30725	32499	26351	19724	27963	31068	28946	21200	23299	19649	23681	46157	41725	29891	45707	52450	46805	32886	46746	27645	36400	26537	40244
		4	35890	53388	43692	45871	50284	44510	41984	50621	32250	28762	35755	35075	52249	50572	31773	26315	35137	36392	31516	41793	29320	33401	33148	44760
		5	45171	56140	43680	41703	52869	56869	57813	28404	36756	38813	40199	50409	38887	36446	64582	60288	37389	36644	44019	40727	53320	55219	55876	42628
		6	52854	64067	47897	43652	55851	53970	54234	53346	41934	56015	61013	48723	59758	47805	41135	50344	46102	49392	67202	46380	44834	59996	53300	39111
		7	36381	35720	48982	43388	38884	37412	51516	44178	54222	41929	45653	36978	51551	47776	43567	40747	45430	34491	42489	57631	43717	26500	35408	43023
		8	43995	44703	42698	53531	57183	51741	46608	39244	37325	28545	23308	49203	56828	61181	54087	40127	40078	60857	39075	54264	33799	24733	23218	40001
		9	50527	45122	44142	53847	56449	46141	45991	45961	39412	25456	31571	58296	53452	34169	38496	43158	35702	43343	37982	43434	34239	34178	35019	32513
		10	37586	48066	38583	47082	35538	41455	42456	45981	32607	30670	30191	36723	45323	41233	43082	45658	45788	39985	56258	47126	25605	31347	29604	42347
		11	49990	39660	54308	63225	53644	44379	42770	42172	42644	40718	25790	35209	41954	47107	44731	27478	31411	53942	60502	39991	24532	33643	32611	41227
		12	34713	47008	53693	62433	55646	45898	51844	37171	48668	43511	40848	40317	37567	43561	38973	36023	38756	41460	36651	25852	31435	36777	32981	37587
		13	37383	53336	60032	36364	64655	49971	49287	51449	38457	45701	44534	55460	54181	47598	48052	57370	46537	51886	52350	32546	34217	30730	33683	40760
		14	37713	59343	52686	50665	42485	54667	51037	45807	32835	26751	34686	63472	42900	53845	54031	52413	37590	54874	57271	65123	33413	24678	34773	48260
		15	53872	44827	48043	62230	55942	50059	43315	52380	51373	39963	53914	52305	54684	49654	51917	52109	54168	39205	52412	43122	49021	32438	25699	47859
		16	45295	42782	39069	39893	66652	48782	40265	35091	36255	37427	37229	42109	51390	43151	48539	47873	34299	47711	50521	54219	24635	32551	29759	36104
		17	47328	44514	42169	38545	28512	26231	33311	22642	22478	20798	23382	20182	31916	37424	33509	33996	36393	42686	55584	46881	36231	29302	26620	39804
		18	54781	53429	53054	41892	54772	54117	43008	43522	29264	46432	49115	56395	52878	37913	43989	55984	48486	40502	45099	46653	42599	39411	22489	30565
		19	40798	50670	53200	35427	51077	55229	55735	53974	31739	33993	37252	45037	59207	54555	42403	45350	56434	52639	47057	37030	30132	38755	26096	51933
		20	41772	38020	48833	47498	44124	42987	37311	51493	50020	33643	37423	39749	52648	57370	44153	44287	38222	51980	56246	48266	27812	30161	25116	48657
		21	48308	45707	44346	42846	47156	56830	46365	40903	41526	34879	36263	49294	40744	46441	54117	56798	39967	37066	48642	41836	44008	29705	27754	41950
		22	49779	38447	48165	32543	46821	50460	51205	54918	33233	31552	54094	51901	43417	38128	49832	52620	41308	48981	43184	37542	45320	41328	32577	43713
		23	42282	57774	43929	30697	46876	45212	49033	54695	37425	44532	55237	50967	42126	55428	46086	42030	53556	40998	47693	43902	40484	38862	47921	27948
		24	34069	44464	40690	37675	35060	41199	46464	34204	38833	42118	49220	39693	41955	31226	36655	35079	36369	47584	38542	35508	36244	37386	38573	39216
		25	37105	38555	48741	39330	40556	49196	51536	36219	31925	32433	39285	36515	30520	28672	24251	33662	47147	48706	61198	44580	46838	48106	52438	47584
		26	39805	54273	57694	40651	52114	63603	55873	45045	42871	45883	55633	44994	48511	55741	52868	57345	67282	42312	66493	47476	40998	64620	41013	33853
		27	61136	58617	39725	46201	67059	55030	43533	60997	57167	53068	43482	37994	64379	55393	50916	47022	46842	56284	59751	52161	50248	54243	60609	49687
		28	45923	45003	44993	59151	45301	47564	41686	44405	41687	56756	60568	49394	32400	53275	54200	56477	55989	45005	49854	49760	38454	40787	46966	35088
		29	58713	45883	46330	48921	49535	36324	51861	59141	51655	47853	42724	49143	51637	50253	43796	39955	63977	58008	49955	41243	49611	41620	57657	45810
		30	36571	38440	55403	49177	39161	59344	48543	51539	60461	45264	50866	58073	44208	32120	47909	53429	55361	41760	47688	52578	47657	59279	42161	48829
		31	50008	46756	47816	45503	55986	40268	53878	52114	58190	43504	47346	48391	52780	44186	52981	53364	53139	46414	44472	50831	63684	54452	39402	34546