МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ім. Ю.М. ПОТЕБНІ

__Електричної інженерії та кіберфізичних систем_
(повна назва кафедри)

Кваліфікаційна робота

_____другий (магістерський) рівень_____
(рівень вищої освіти)

на тему: Підвищення ефективності споживання електричної енергії ПрАТ «Дніпроспецсталь»

Виконав: студент _2_ курсу, групи_8.1413 -з-дн _
спеціальності _____141__Електроенергетика,_____
електротехніка та електромеханіка _____
(код і назва спеціальності)
спеціалізації _____
(код і назва спеціалізації)
освітньої програми Електроенергетика,_____
електротехніка та електромеханіка _____
(назва освітньої програми)
_____Шпетер Б. В._____
(ініціали та прізвище)

Керівник ___д.т.н., проф., Коваленко В.Л.
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)
Рецензент__д.т.н., проф., Артемчук В.В._____
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Запоріжжя
2025

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Інженерний навчально-науковий інститут_____
Кафедра____Електричної інженерії та кіберфізичних систем _____
Рівень вищої освіти____другий (магістерський) рівень
Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(код та назва)
Спеціалізація _____
(код та назва)
Освітня програма «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»_____

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
д.т.н., проф._____В.Л. Коваленко
«__01___»_____03____2025__року

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ

_____ Шпетеру Борису Володимировичу _____
(прізвище, ім'я, по батькові)
1 Тема роботи Підвищення ефективності споживання електричної енергії ПрАТ «Дніпроспецсталь»
керівник роботи ___ Коваленко В.Л., д.т.н., проф. Коваленко В.Л.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом ЗНУ від «_28_»_лютого__2024__року №_361 - с_____
2 Строк подання студентом роботи _____01 грудня 2024 р._____
3. Вихідні дані до роботи: Середньодобове споживання електроенергії ПрАТ «Дніпроспецсталь». Перелік основного обладнання цехів ПрАТ «Дніпроспецсталь». Технологічна схема виробництва продукції цехами ПрАТ «Дніпроспецсталь». Однолінійні схеми електропостачання цехів ПрАТ «Дніпроспецсталь».
4 Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1. Теоретичні основи підвищення ефективності енергоспоживання в промисловості 2. Аналіз енергоспоживання ПрАТ «Дніпроспецсталь» 3. Шляхи підвищення ефективності використання електроенергії на підприємстві 4. Оцінка ефективності запропонованих заходів

5. Перелік графічного матеріалу 1) Тема, мета, завдання, наукова новизна, практичне значення дослідження 2) Схема технологічних процесівПраТ «Дніпроспецсталь» 3) Аналіз енергоспожиання ПрАТ «Дніпроспецсталь» 4) Схема розташування обладнання 5) Схема однолінійна 6) Аналіз системи електропостачання підприємства 7) Результати моделювання 8) Висновки.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділ 1	Коваленко В.Л., д.т.н., проф.		
Розділ 2	Коваленко В.Л., д.т.н., проф.		
Розділ 3	Коваленко В.Л., д.т.н., проф.		
Розділ 4	Коваленко В.Л., д.т.н., проф.		

7. Дата видачі завдання_____01.11.2024 р._____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Теоретичні основи підвищення ефективності енергоспоживання в промисловості	30.09.2024	
2	Аналіз енергоспоживання ПрАТ «Дніпроспецсталь»	15.10.2024	
3	Шляхи підвищення ефективності використання електроенергії на підприємстві	13.11.2024	
4	Оцінка ефективності запропонованих заходів	29.11.2024	

Студент _____ _____Б. В._Шпетер
(підпис) (ініціали та прізвище)

Керівник роботи _____ _____В.Л. Коваленко_____
(підпис) (ініціали та прізвище)

Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер _____ _____І.І. Коваленко___
(підпис) (ініціали та прізвище)

АНОТАЦІЯ

Шпетер Б. В. Підвищення ефективності споживання електричної енергії ПрАТ «Дніпроспецсталь» – кваліфікаційна випускна робота для здобуття ступеня магістра за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, науковий керівник – проф. В.Л. Коваленко. Запорізький національний університет, Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М.Потебні, кафедра електричної інженерії та кіберфізичних систем, 2024.

У сучасних умовах промислові підприємства змушені шукати шляхи зниження витрат на електроенергію, адже постійне зростання тарифів, екологічні обмеження та потреба в підвищенні конкурентоспроможності роблять енергозбереження одним із пріоритетних напрямів розвитку. Особливо це стосується металургійних підприємств, які споживають значні обсяги електроенергії та мають високу енергоємність виробництва.

Одним із таких підприємств є ПрАТ «Дніпроспецсталь» — провідний виробник спеціальних марок сталі в Україні. Високий рівень споживання електроенергії на цьому підприємстві пояснюється використанням електродугових печей, потужних електродвигунів та складних технологічних процесів. Саме тому постала необхідність знайти шляхи оптимізації енергоспоживання, що і стало головною метою цього дослідження.

Протягом роботи було проведено детальний аналіз поточного стану енергоспоживання на підприємстві. Виявлено основні проблеми, серед яких перевитрати електроенергії через застаріле обладнання, неефективне регулювання навантажень та низька автоматизація процесів. Крім того, значну роль у високих витратах відіграє недостатнє використання відновлюваних джерел енергії та вторинних ресурсів.

З метою зниження енергоспоживання запропоновано кілька ефективних заходів. Одним із ключових рішень стала автоматизація систем

енергоменеджменту, що дозволяє в реальному часі контролювати та коригувати використання електроенергії. Впровадження частотних перетворювачів на електродвигунах дає змогу зменшити споживання енергії на 10-15%, а модернізація електродугових печей із застосуванням регенеративних пальників дозволяє скоротити витрати електроенергії ще на 20%. Важливим кроком стало використання технологій утилізації вторинних енергоресурсів, що дозволяє повторно використовувати тепло, яке раніше просто втрачалося.

Не менш важливий напрямок дослідження – оцінка економічної ефективності запропонованих заходів. Було проведено розрахунки, які показали, що сукупне скорочення енергоспоживання може становити 17,6%, що дозволить зекономити 1 025 000 тис. грн на рік. Окупність інвестицій у впровадження енергоефективних рішень складе 1,5-3 роки, що є вкрай вигідним показником для великого промислового підприємства.

Окремо варто відзначити екологічний ефект від запропонованих заходів. Завдяки зниженню споживання електроенергії очікується скорочення викидів CO_2 на 120 000 тонн щорічно, що відповідає сучасним екологічним вимогам ЄС та стратегії України щодо зменшення впливу промисловості на довкілля.

Проведене дослідження має важливе практичне значення. Запропоновані заходи можуть бути впроваджені не лише на ПрАТ «Дніпроспецсталь», але й на інших металургійних підприємствах. Наукова новизна роботи полягає в комплексному підході до підвищення енергоефективності, що включає як технічні рішення, так і організаційні заходи.

Підсумовуючи, можна сказати, що енергетична оптимізація металургійного підприємства – це не лише можливість знизити витрати, а й реальний внесок у сталий розвиток галузі. Впровадження сучасних технологій та підходів до управління енергоспоживанням забезпечить підвищення конкурентоспроможності підприємства, сприятиме його довгостроковій економічній стабільності та допоможе мінімізувати негативний вплив на довкілля.

ABSTRACT

Shpeter B. V. Increasing the Efficiency of Electricity Consumption at PJSC "Dniprospetsstal" – Qualification thesis for obtaining a Master's degree in specialty 141 – Electrical Power Engineering, Electrical Engineering, and Electromechanics, scientific supervisor – Prof. V.L. Kovalenko. Zaporizhzhia National University, Engineering Educational and Scientific Institute named after Yu.M. Potebnia, Department of Electrical Engineering and Cyber-Physical Systems, 2024.

In modern conditions, industrial enterprises are forced to seek ways to reduce electricity costs, as the constant rise in tariffs, environmental restrictions, and the need to enhance competitiveness make energy conservation one of the priority areas of development. This is especially relevant for metallurgical enterprises, which consume significant amounts of electricity and have high energy-intensive production processes.

One such enterprise is PJSC "Dniprospetsstal", a leading producer of special steel grades in Ukraine. The high level of electricity consumption at this enterprise is due to the use of electric arc furnaces, powerful electric motors, and complex technological processes. Therefore, there is an urgent need to optimize energy consumption, which became the main objective of this research.

Throughout the study, a detailed analysis of the current state of energy consumption at the enterprise was conducted. The main problems were identified, including excessive electricity consumption due to outdated equipment, inefficient load regulation, and low automation of processes. Additionally, insufficient utilization of renewable energy sources and secondary resources plays a significant role in high energy costs.

To reduce energy consumption, several effective measures have been proposed. One of the key solutions was the automation of energy management systems, which allows real-time monitoring and adjustment of electricity use. The introduction of frequency converters in electric motors enables a 10-15% reduction in energy consumption, while the modernization of electric arc furnaces with regenerative burners

can further reduce electricity costs by 20%. An important step was the implementation of secondary energy resource utilization technologies, allowing for the reuse of previously wasted heat.

Another crucial area of research is the economic evaluation of the proposed measures. The calculations showed that the total reduction in energy consumption could reach 17.6%, resulting in an annual savings of 1,025,000 thousand UAH. The payback period for investments in energy-efficient solutions is estimated at 1.5 to 3 years, which is an extremely favorable indicator for a large industrial enterprise.

The environmental impact of the proposed measures is also noteworthy. Reducing electricity consumption is expected to cut CO_2 emissions by 120,000 tons annually, which complies with modern EU environmental standards and Ukraine's strategy for reducing industrial environmental impact.

This research has significant practical importance. The proposed measures can be implemented not only at PJSC "Dniprospetsstal", but also at other metallurgical enterprises. The scientific novelty of the study lies in a comprehensive approach to improving energy efficiency, which includes both technical solutions and organizational measures.

In conclusion, the optimization of energy consumption in metallurgical enterprises is not only a way to reduce costs but also a real contribution to the sustainable development of the industry. The implementation of modern technologies and energy management approaches will enhance the enterprise's competitiveness, contribute to its long-term economic stability, and help minimize the negative impact on the environment.

ЗМІСТ

Вступ……10

1 Теоретичні основи підвищення ефективності енергоспоживання в промисловості……14

1.1. Загальні засади енергоспоживання в металургійній промисловості….14

1.1.1 Енергоємність металургії: глобальний і національний контекст….14

1.1.2 Основні процеси та структура енергоспоживання……..18

1.1.3 Технології та енергоефективність: міжнародний досвід……23

1.1.4 Низьковуглецеві технології та їх вплив на енергоспоживання……..25

1.1.5 Економічний аспект енергоспоживання……..28

1.2 Поняття енергоефективності та показники її оцінки ……..31

1.2.1 Основні показники енергоефективності в металургії…….31

1.2.2 Сучасні енергоефективні технології у металургії……...38

1.2.3 Міжнародний досвід впровадження енергоефективних технологій.43

1.2.4 Економічний аспект та окупність заходів……47

1.3. Методи зниження витрат електроенергії на підприємствах металургійної галузі……...56

1.4. Аналіз міжнародного досвіду впровадження енергоефективних заходів……..59

2 Аналіз енергоспоживання ПрАТ «Дніпроспецсталь»……..…..62

2.1. Загальна характеристика підприємства……..62

2.2. Аналіз структури та динаміки електроспоживання……...64

2.3. Виявлення основних проблем і факторів неефективного використання електроенергії……..…67

2.4. Оцінка енергетичних втрат у виробничих процесах……70

3 Шляхи підвищення ефективності використання електроенергії на підприємстві……....73
3.1. Впровадження енергоощадних технологій у виробничий процес…...73
3.2. Оптимізація режимів роботи обладнання та енергоменеджмент…….75
3.3. Використання альтернативних джерел енергії……..86
3.4. Автоматизація контролю та управління електроспоживанням……89
3.5. Економічна оцінка запропонованих заходів……..92
4. Оцінка ефективності впроваджених заходів…….95
4.1. Методика оцінки ефективності заходів з енергозбереження……95
4.2. Прогноз зменшення енергоспоживання після впровадження заходів……...97
Висновки……...……..105
Перелік посилань……109
Додаток А ……...116

ВСТУП

Ефективне споживання електричної енергії є однією з ключових проблем сучасної промисловості, особливо в умовах зростаючих тарифів на енергоресурси, необхідності зниження виробничих витрат та впровадження принципів сталого розвитку. Металургійна галузь, яка традиційно є однією з найбільш енергоємних, стикається з викликами щодо оптимізації електроспоживання, мінімізації втрат та підвищення енергоефективності технологічних процесів. В умовах глобальних економічних змін, посилення екологічних вимог та необхідності підвищення конкурентоспроможності, питання раціонального використання електричної енергії на підприємствах металургійного комплексу набуває особливої актуальності.

ПрАТ «Дніпроспецсталь» є одним із провідних підприємств металургійної галузі України, що спеціалізується на виробництві спеціальних сталей та сплавів. Енергозабезпечення виробничих процесів відіграє вирішальну роль у стабільності функціонування підприємства, проте значна частина електроенергії використовується неефективно через застарілі технології, недосконалу систему енергоменеджменту та відсутність комплексного підходу до впровадження енергозберігаючих заходів. Високий рівень енергоспоживання та його значна частка у структурі витрат вимагають розробки та реалізації ефективних механізмів оптимізації електроспоживання. Таким чином, дослідження шляхів підвищення енергоефективності на підприємстві є не лише економічно доцільним, але й стратегічно важливим для його подальшого розвитку.

Метою даного дослідження є розробка та обґрунтування заходів, спрямованих на підвищення ефективності споживання електричної енергії на ПрАТ «Дніпроспецсталь». Для досягнення цієї мети було сформульовано наступні завдання: провести аналіз сучасного стану електроспоживання підприємства,

ідентифікувати основні проблеми та фактори, що впливають на рівень енерговитрат, оцінити потенціал впровадження енергозберігаючих технологій та автоматизованих систем контролю, розробити комплексні заходи щодо підвищення енергоефективності, а також здійснити економічне обґрунтування доцільності їх реалізації.

Об'єктом дослідження є процеси споживання електричної енергії на ПрАТ «Дніпроспецсталь». Предметом дослідження виступають технологічні, організаційні та економічні аспекти підвищення енергоефективності, зокрема методи оптимізації електроспоживання, модернізація обладнання, впровадження систем енергоменеджменту та аналіз ефективності застосування альтернативних джерел енергії.

Для проведення дослідження використано широкий спектр методологічних підходів, зокрема методи системного аналізу для оцінки енергоспоживання підприємства, економіко-статистичні методи для обґрунтування доцільності впровадження заходів з енергозбереження, методи математичного моделювання для прогнозування результатів оптимізації енергоспоживання, а також експертні оцінки для визначення можливостей використання інноваційних технологій. Аналіз здійснюється на основі фактичних даних підприємства, що дозволяє отримати достовірні результати та зробити обґрунтовані висновки.

Наукова новизна дослідження полягає в розробці комплексного підходу до оптимізації електроспоживання на металургійному підприємстві, який поєднує технічні, організаційні та економічні аспекти. Запропоновані заходи базуються на сучасних технологіях енергозбереження та цифровізації управлінських процесів, що дозволяє підвищити ефективність використання електроенергії без зниження продуктивності виробництва. Особливу увагу приділено впровадженню автоматизованих систем контролю енергоспоживання, використанню регенеративних технологій у виробничих процесах та розробці заходів з підвищення енергетичної культури персоналу підприємства.

Практичне значення роботи полягає у можливості застосування її результатів для розробки та реалізації програм енергоефективності на ПрАТ «Дніпроспецсталь», що сприятиме зниженню витрат на електроенергію, підвищенню економічної ефективності діяльності підприємства та зменшенню негативного впливу виробництва на довкілля. Отримані результати можуть бути використані також іншими підприємствами металургійної галузі, що прагнуть оптимізувати свої енергетичні витрати та впровадити сучасні технології управління електроспоживанням.

Магістерська робота складається з чотирьох розділів. У першому розділі розглядаються теоретичні основи енергоспоживання у промисловості, визначаються основні принципи енергоефективності, аналізуються методи підвищення ефективності використання електроенергії та вивчається світовий досвід у цій сфері. Другий розділ присвячений аналізу електроспоживання на ПрАТ «Дніпроспецсталь», оцінці його динаміки та структури, виявленню основних проблем та неефективних енергетичних витрат. У третьому розділі розглядаються можливі шляхи підвищення енергоефективності підприємства, зокрема впровадження новітніх технологій, автоматизація процесів управління енергоспоживанням, оптимізація режимів роботи обладнання та використання альтернативних джерел енергії. Четвертий розділ містить оцінку ефективності запропонованих заходів, обґрунтування їх економічної доцільності та аналіз очікуваного впливу на виробничі процеси та фінансові показники підприємства.

Завершується робота висновками та рекомендаціями щодо реалізації заходів з підвищення енергоефективності на ПрАТ «Дніпроспецсталь». У висновках узагальнюються результати дослідження, формулюються основні положення щодо можливостей оптимізації електроспоживання та визначаються перспективи подальших досліджень у цій сфері.

Таким чином, дане дослідження є актуальним, науково обґрунтованим та має практичну цінність для підприємств металургійної галузі, які прагнуть підвищити

ефективність використання електроенергії, знизити витрати та забезпечити стале функціонування виробничих процесів.

1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ В ПРОМИСЛОВОСТІ

1.1. Загальні засади енергоспоживання в металургійній промисловості

1.1.1 Енергоємність металургії: глобальний і національний контекст

Сталь є ключовим будівельним блоком сучасного суспільства. Вона використовується для інфраструктури, будівель, побутової техніки, транспортних засобів, упаковки та багатьох інших продуктів. Її унікальне поєднання міцності, довговічності та можливості переробки ускладнює заміну сталі іншими матеріалами. Крім того, вона є відносно дешевою та широко доступною. Протягом останніх п’ятдесяти років її використання неухильно зростало, і якщо на глобальному рівні не буде вжито активних та скоординованих заходів для скорочення споживання, попит на сталь до 2050 року може зрости більш ніж на третину [1].

Через високу залежність від енергії та викопної сировини традиційне виробництво сталі є енергоємним та призводить до значних викидів вуглецю. У 2019 році сталеливарний сектор був відповідальним за 8% кінцевого світового споживання енергії або 20% промислового використання [1]. У 2020 році цей сектор спричинив 11% глобальних викидів CO_2 та 7% загального використання енергії та пов’язаних із виробничими процесами викидів парникових газів [2,3].

Щоб досягти цілі Паризької угоди у 1,5°C і уникнути найкатастрофічніших наслідків зміни клімату, викиди CO_2 мають бути зменшені вдвічі до кінця цього десятиліття і досягти нульового рівня до 2050 року, що вимагає негайного скорочення викидів парникових газів у всіх секторах [4].

Сталеливарна промисловість, яка має один із найенергоємніших і найбільш забруднюючих процесів, стоїть перед значними викликами на шляху до декарбонізації. Дослідження показують, що існуючі рішення для зменшення

споживання енергії та заміни викопного палива не будуть достатніми для досягнення необхідного скорочення викидів. Потрібні трансформаційні зміни із застосуванням технологій, які перебувають на різних етапах розробки [5-9].

Металургійна промисловість належить до найбільш енергоємних секторів економіки. На світовому рівні на неї припадає близько 8% кінцевого споживання енергії і приблизно 20% енерговитрат промисловості [1]. Зокрема, сталеливарний сектор споживає величезні обсяги енергії: за оцінками, у 2019 році виробництво сталі забезпечило ≈7% глобальних викидів CO_2 і вимагало значних енергоресурсів через домінування доменного процесу на викопному паливі [10]. Історично галузь досягла суттєвого прогресу в енергоефективності – витрати енергії на тонну сталі зменшилися на ~60% від 1960 року завдяки впровадженню кращих технологій та енергоменеджменту [11].

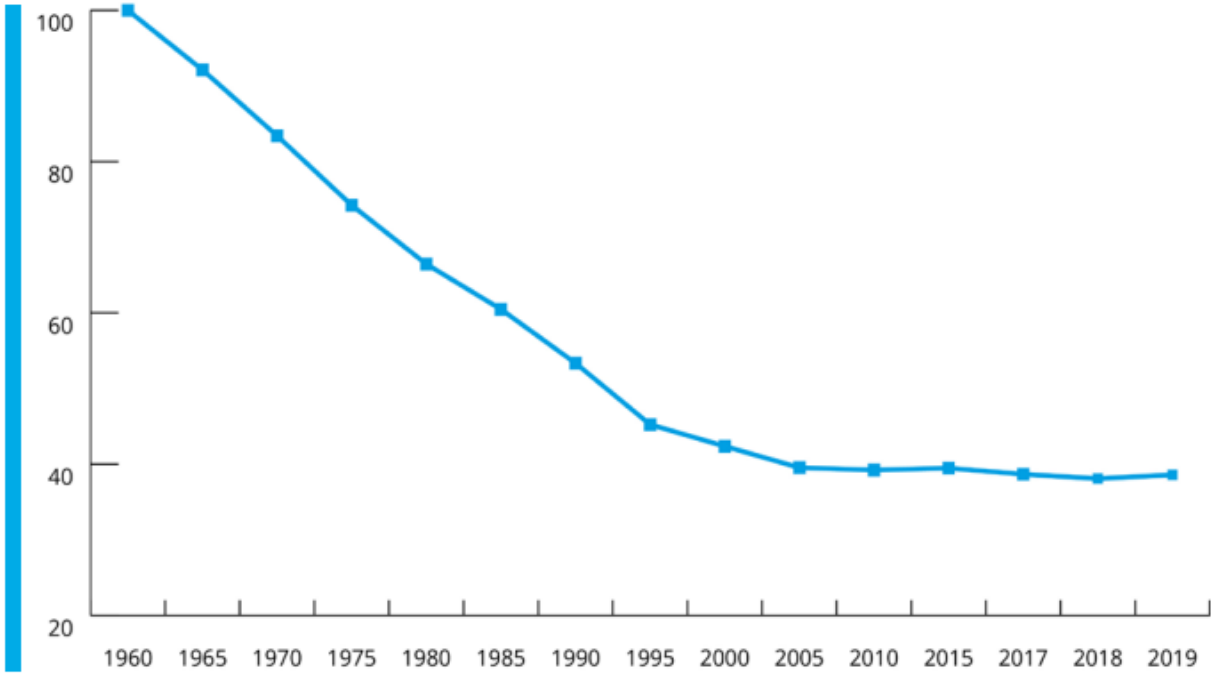


Рисунок 1.1 Індексоване глобальне споживання енергії на тонну виробництва сирої сталі [11]

Графік рисунка 1.1 показує індексоване глобальне споживання енергії на тонну виробництва сирої сталі в період з 1960 по 2019 рік. З 1960–2000 рр.

спостерігається значне зниження споживання енергії на тонну виробництва сирої сталі. Споживання енергії на тонну сталі поступово знижувалося з 1960-х років до початку 2000-х. Це є результатом підвищення енергоефективності, впровадження нових технологій і переходу на більш ефективні процеси виплавки сталі (наприклад, електродугові печі замість доменних).

Після 2000 року темпи зниження споживання енергії значно сповільнилися, і показник стабілізувався на рівні близько 40% від початкового значення (1960 р.). Це свідчить про досягнення певних технологічних меж у зменшенні енергетичних витрат.

На останньому відрізку графіка (2015-2019 рр.) видно незначне зростання споживання енергії. Це пов’язано з тим, що після досягнення межі ефективності будь-які подальші покращення є складнішими, або через тимчасові фактори, такі як зміни в сировинній базі чи виробничих процесах.

Зниження споживання енергії на тонну виробництва сталі обумоалено рядом факторів, а саме: впровадженням енергоефективних технологій у виробництві сталі; переходом до переробки металобрухту в електродугових печах, які споживають менше енергії; поліпшенням термічних процесів і використання вторинного тепла; глобальними ініціативами щодо зниження викидів CO_2 та підвищенням ефективності виробництва.

Рисунок 1.1 демонструє довготривалий тренд до підвищення енергоефективності у виробництві сталі. Однак у найближчому майбутньому можливості подальшого зниження споживання енергії можуть бути обмеженими без проривних технологічних змін.

Україна не є винятком: металургія традиційно формує значне навантаження на енергосистему. У 2020–2021 роках частка металургійних підприємств у загальному споживанні електроенергії країни становила 23%, поступаючись лише населенню [12]. Це підкреслює критичну важливість енергоефективності для національної економіки. Разом з тим, енергоємність притаманна і кольоровій

металургії – наприклад, виробництво 1 тонни первинного алюмінію потребує в середньому 14–17 тис. кВт·год електроенергії [13], що підтверджує високі енергетичні витрати галузі. Таким чином, оптимізація енергоспоживання у металургії є актуальною задачею як з точки зору забезпечення конкурентоспроможності, так і для енергобезпеки та екології.

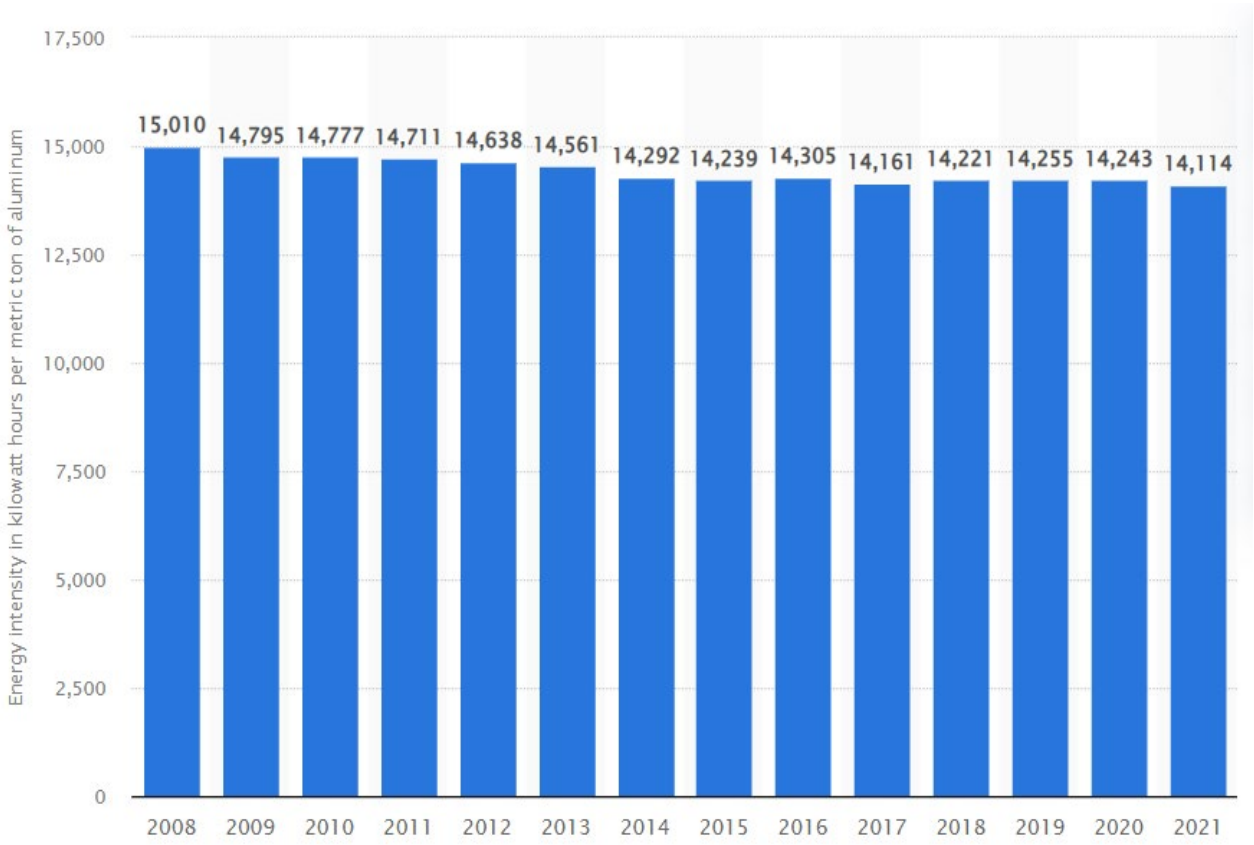


Рисунок 1.2 Енергетична інтенсивність у кіловат-годинах на виробництво метричної тонни алюмінію з 2008 по 2021 рік [13]

Цей графік выдображає тенденції, як протягом більше десяти років людство намагалося зробити виробництво алюмінію більш енергоефективним. У 2008 році на кожну тонну виплавленого алюмінію припадало 15 010 кВт·год енергії. Це величезні витрати, якщо задуматися про масштаби виробництва цього металу по всьому світу.

Але з кожним роком промисловість ставала більш ефективною. У наступні роки показник поступово знижувався. До 2014 року він впав до 14 239 кВт·год, що свідчило про вдосконалення технологій, оптимізацію виробничих процесів та, можливо, перехід на більш сучасне обладнання. Проте, після 2015 року зміни стали менш помітними. Значення коливалося в межах 14 100 – 14 300 кВт·год, що може свідчить про досягнення технологічних обмежень у традиційних методах виробництва алюмінію. 2021 рік завершує цю тенденцію із показником 14 114 кВт·год, що майже дорівнює значенню попередніх років. Це натякає на те, що без кардинальних інновацій зменшити енергоспоживання в цій галузі стає все складніше.

Таким чином, графік відображає довгий шлях промисловості у прагненні до енергоефективності: від відчутного прогресу в перші роки до поступової стабілізації, що говорить про межі можливостей сучасних технологій.

1.1.2 Основні процеси та структура енергоспоживання

Металургійні виробництва характеризуються складним технологічним циклом, кожен етап якого споживає велику кількість енергії.

Так в якості прикладу розглянемо особливості доменно – конверторного процесу. Цей комплексний процес охоплює процес підготовки сировини, процес виробництва чавуну, процес виробництва сталі та процес прокатки [14]. Як відомо [14], виробництво сталі – це складний технологічний процес, що потребує значних енергетичних ресурсів і точного контролю хімічних реакцій. Один із найпоширеніших методів виплавки сталі у світі – доменно-конвертерний процес, який дозволяє ефективно переробляти залізну руду у високоякісну сталь. Цей

процес складається з двох основних етапів: виплавка чавуну у доменній печі; переробка чавуну у сталь у кисневому конвертері.

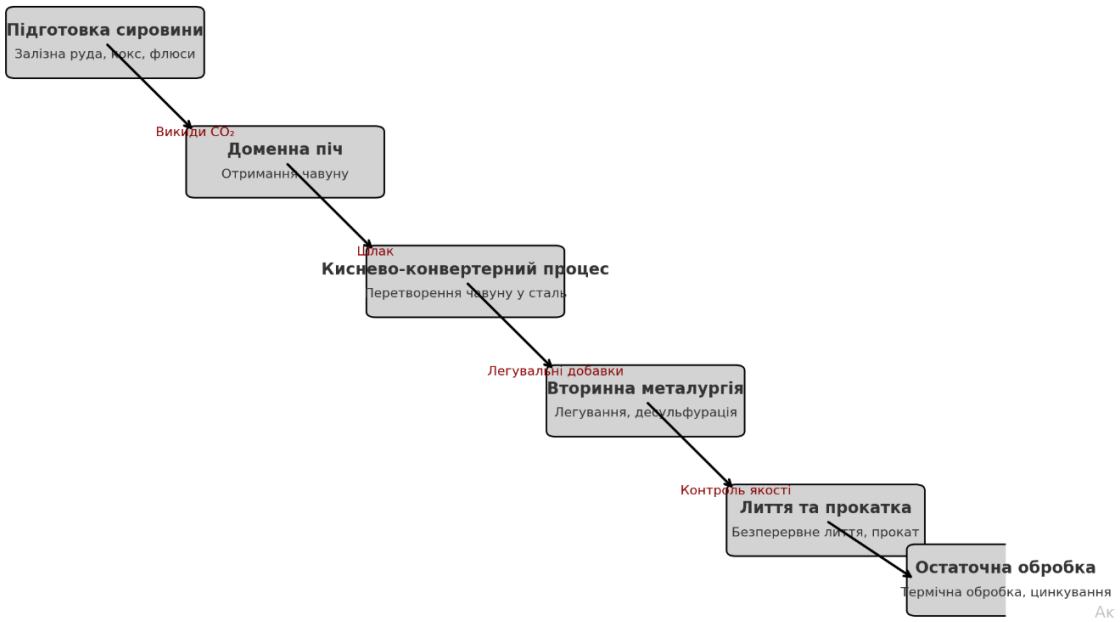


Рисунок 1.3 Структурована технологічна карта доменно-конвертерного процесу

Доменний процес:

Доменна піч – це висока вертикальна споруда, яка працює безперервно. Сировина завантажується у верхню частину печі, а кінцевий продукт (рідкий чавун і шлак) виводиться внизу. Температура всередині печі досягає 2000°C, що забезпечує необхідні умови для відновлення заліза з руди. Щоб отримати чавун, у доменну піч завантажують три основні компоненти: Залізна руда (гематит Fe_2O_3 або магнетит Fe_3O_4) – основне джерело заліза; Кокс (C) – паливо, яке забезпечує тепло і служить відновником; Флюси ($CaCO_3$, доломіт) – допомагають видаляти домішки і утворювати шлак.

Основний процес у доменній печі – це відновлення заліза з його оксидів. Це відбувається поетапно:

Відновлення заліза з гематиту:

$$Fe_2O_3+3CO\rightarrow 2Fe+3CO_2 \quad (1.1)$$

Відновлення заліза з магнетиту:

$$Fe_3O_4+4CO\rightarrow 3Fe+4CO_2 \quad (1.2)$$

Генерація відновника (оксиду вуглецю CO):

$$C+O_2\rightarrow CO_2 \quad (1.3)$$

$$CO_2+C\rightarrow 2CO \quad (1.4)$$

Окрім заліза, руда містить домішки (Si, Mn, S, P), які необхідно видалити. Для цього використовують флюси:

$$CaCO_3\rightarrow CaO+CO_2 \quad (1.5)$$

$$CaO+SiO_2\rightarrow CaSiO_3 \quad (1.6)$$

Таким чином, домішки переходять у шлак, а на дні печі накопичується рідкий чавун із вмістом 4-5% вуглецю. Після цього розплавлений чавун випускають і транспортують у кисневий конвертер для подальшої переробки.

Киснево-конвертерний процес:

Рідкий чавун, отриманий у доменній печі, містить надмірну кількість вуглецю та інших домішок, що робить його крихким і непридатним для використання в промисловості. Щоб отримати сталь, необхідно зменшити вміст вуглецю та видалити інші небажані елементи. Це відбувається в кисневому конвертері. Конвертер – це великий стальний котел, що нахиляється для завантаження чавуну та випуску сталі. У нього подають: рідкий чавун (75-85%); металобрухт (15-25%) – використовується для охолодження розплаву; чистий кисень (O_2) під тиском 10-12 бар – головний окислювач, який спалює домішки.

Основні хімічні реакції в конвертері:

Окиснення вуглецю:

$$C+O_2 \rightarrow CO_2 \quad (1.7)$$

Реакція екзотермічна і підвищує температуру металу.

Видалення кремнію:

$$Si+O_2 \rightarrow SiO_2 \quad (1.8)$$

Окиснення марганцю:

$$Mn+O2 \rightarrow MnO \quad (1.9)$$

Окиснення фосфору (з видаленням у шлак):

$$P+O_2 \rightarrow P_2O_5 \quad (1.10)$$

Після 20-30 хвилин процес завершується, і утворюється сталь із вмістом вуглецю <2%. Далі додають легуючі елементи (Cr, Ni, Mo), щоб отримати необхідні властивості.

У чорній металургії (виробництво сталі) ключові стадії такі:

Підготовка сировини: агломерація (спікання) залізної руди та виробництво окатишів, а також коксування вугілля. Ці процеси потребують теплової енергії для спікання рудного концентрату і випалу коксу. Теоретичні мінімальні витрати енергії на цих стадіях оцінюються в межах ~2,5 ГДж на тонну коксу і ~1,0 ГДж на тонну агломерату відповідно [14], отже вони суттєво впливають на загальну енергоємність.

Виробництво чавуну: доменний процес (BF) оснований на використанні коксу як палива і відновника. Він забезпечує високу продуктивність, але переважно покладається на енергію від спалювання вугілля. Для прикладу, ~89% енергії в циклі BF-BOF (доменна піч – кисневий конвертор) надходить із коксу й вугілля, і лише ~7% – з електроенергії [11]. Електричні витрати доменного виробництва відносно малі – порядку 3…4 кВт·год на тонну гарячого чавуну [15], оскільки основне теплове навантаження забезпечує кокс.

Виробництво сталі: традиційний конверторний процес (BOF) використовує енергію розплавленого чавуну і незначну частку додаткового палива, тоді як альтернативний електроплавильний шлях – дугова сталеплавильна піч (EAF) – споживає переважно електроенергію. Електровитрати на виплавку сталі в ЕДП надзвичайно високі, типовий рівень становить близько 300–400 кВт·год на тонну сталі [15]. Для порівняння, мартенівські печі (застаріла технологія, нині майже не використовується) споживали ~4 кВт·год електроенергії на тонну сталі [15], проте потребували значної кількості палива, через що мали низьку ефективність і були витіснені сучаснішими процесами.

Прокат та обробка: гарячий і холодний прокат, термічна обробка, тощо – ці стадії теж вимагають енергії (переважно для нагрівання заготовок, приводу прокатних станів, компресорів тощо). Хоча їх частка в загальному енергобалансі менша, оптимізація цих процесів (наприклад, за рахунок утилізації тепла гарячого металу, скорочення простоїв) також дає ефект.

Первинне виробництво сталі з руди є значно енергоінтенсивнішим, ніж вторинне з брухту. Переплавлення брухту в електропечах вимагає приблизно в 8 разів менше енергії, ніж повний цикл від залізної руди [16]. За даними [1], виплавка сталі із брухту може потребувати лише ~12–15% енергії порівняно з рудним маршрутом [16]. Це пояснюється тим, що в вторинному виробництві відсутня стадія відновлення заліза з оксидів – найбільш енергомістка хімічно. В середньому,

інтегрований цикл BF-BOF споживає ~19–35 ГДж на тонну сталі, тоді як EAF на брухті – близько 4…7 ГДж/т [17,11].

Точні показники залежать від якості сировини, асортименту продукції та рівня оснащення заводу. Так, якість руди і коксу, вихід стали із шлаку, глибина переробки – всі ці фактори впливають на питомі витрати енергії. Навіть непрямі витрати – видобуток і транспортування сировини – додають ~6–9% до сумарного енергоспоживання на тонну металу [11]. Таким чином, розуміння структури енергоспоживання в межах виробничого ланцюга дозволяє виявити "гарячі точки" – найбільш енергоємні переділи – і спрямувати зусилля на їх оптимізацію.

1.1.3 Технології та енергоефективність: міжнародний досвід

За останні десятиліття металургія накопичила значний міжнародний досвід впровадження енергозберігаючих технологій. Багато з них відображені у міжнародних стандартах найкращих практик (Best Available Techniques, BAT) та галузевих довідниках. Дослідження показують, що застосування сучасних енергоефективних технологій здатне скоротити енергоспоживання сталі приблизно на 20% проти середнього рівня, якщо по всьому світу довести виробництво до рівня Best Available Techniques [17]. Половину цього потенціалу покращення припадає на країни з традиційно вищими питомими витратами (зокрема, Китай [17]).

Ключові напрямки підвищення енергоефективності включають:

Утилізація вторинних енергоресурсів. Сучасні комбінати широко впроваджують системи утилізації тепла і газів: наприклад, використання доменного газу і конвертерного газу для генерації електроенергії або нагріву повітря, установка установок когенерації, сухе гасіння коксу (CDQ) для повернення тепла від коксу, турбогенератори топкового тиску (TRT) на доменних печах. Ці заходи

дозволяють ефективніше використовувати енергію палива і знижувати витрати на сторонні енергоносії. За оцінками World Steel Association, до 60–75% енергії, що міститься в газах доменного і коксового виробництва, може бути повернуто в цикл або використано для вироблення електрики замість втрат [11].

Модернізація обладнання і процесів. Перехід на новітні агрегати – такі як печі з регенеративними пальниками, більш досконалі системи подачі кисню, перехід з мартенів на конвертори або електропечі – приводить до суттєвої економії енергії на тонну продукції. Наприклад, заміна застарілих мартенівських печей в світі практично завершена, що ліквідувало їх характерно низьку ефективність. Натомість, електродугові печі з сучасними системами керування досягли високої продуктивності та можуть працювати із зниженими втратами тепла. Так само, впровадження безперервного розливання сталі замість багатостадійного прокату дозволило скоротити повторні нагріви злитків і заощадити паливо.

Енергоменеджмент та цифрові технології (Industry 4.0). На багатьох підприємствах діють автоматизовані системи енергоменеджменту (EMS), які моніторять та оптимізують споживання енергії в режимі реального часу [11].

Використання датчиків, великих даних та штучного інтелекту дозволяє краще регулювати роботу печей, компресорів, прокатних станів, мінімізувати холості простої та пікові навантаження. У ЄС фіксуються приклади, коли цифровізація забезпечила до 30+% покращення енергоефективності на окремих дільницях [18]. Хоча вплив Industry 4.0 ще досліджується, тенденція очевидна: «розумні» заводи здатні більш раціонально використовувати енергію, зменшуючи витрати та викиди.

Інші заходи: підвищення якості теплоізоляції та використання сучасних матеріалів (наприклад, більш довговічні вогнетриви, що знижують втрати тепла); регенерація тепла охолоджуючих систем; впровадження високоефективних електродвигунів і частотних перетворювачів для механізмів тощо – все це в сукупності формує культуру енергозбереження на підприємствах. Такі заходи часто

мають відносно короткий період окупності і підтримуються міжнародними програмами енергоефективності.

Міжнародний досвід демонструє ефективність згаданих підходів. Приміром, у розвинених країнах (Японія, Південна Корея, ЄС) енергоємність виробництва сталі зараз наближається до теоретичних меж завдяки широкому впровадженню BAT. Натомість у країнах, що розвиваються, спостерігається ширший діапазон, але активна модернізація (особливо в Китаї, який дає ~50% світової сталі). Важливо, що більше половини світового потенціалу енергозбереження в сталі зосереджено саме в китайській металургії [17]– це стимулює міжнародні проекти обміну технологіями та інвестиції в оновлення сталеплавильних потужностей. Українська металургія також впроваджує енергоощадні рішення: останніми роками реалізовано проекти з утилізації газів, модернізовано прокатні стани, встановлено більш ефективні котли та нагрівачі на ряді комбінатів. Таким чином, глобальний тренд на підвищення енергоефективності охоплює і національний рівень, що відображено у публікаціях і дослідженнях вітчизняних науковців за останні 5 років.

1.1.4 Низьковуглецеві технології та їх вплив на енергоспоживання

Сучасні виклики кліматичної політики стимулюють технологічну трансформацію металургії**,** спрямовану на декарбонізацію. Ці нові технології впливають не лише на рівень емісії CO_2, але й на структуру та обсяги енергоспоживання**.** Міжнародний досвід пропонує кілька напрямів: перехід на водень як відновник, електрифікацію процесів, використання біомаси, а також уловлювання вуглецю (CCS/CCUS).

Кожен із цих шляхів має свої енергетичні та економічні особливості:

Водневе відновлення заліза (H_2-DRI). Технології прямого відновлення заліза з використанням водню замість природного газу або коксу набирають популярності (проекти в ЄС: HYBRIT, H2FUTURE тощо). Водень дозволяє майже повністю усунути викиди CO_2 на стадії відновлення руди, проте виробництво водню потребує великої кількості електроенергії (особливо якщо це зелений водень шляхом електролізу). Дослідження прогнозують, що перехід від традиційної аглодоменної технології до водневого DRI і електропечей призведе до багатократного зростання споживання електроенергії. Зокрема, за розрахунками українських вчених, для виплавки 10 млн т сталі на рік електропопит зросте з ~2,74 до 35,13 млрд кВт·год (у 12,8 рази) при повному переході на H_2-DRI + EAF, порівняно з існуючим доменним циклом [19-21]. Відповідно, вимога до електричної потужності підскочить з ~0,5 ГВт до 6,15 ГВт [19]. Це колосальний виклик для енергетичної інфраструктури, який, утім, супроводжується значним скороченням викидів парникових газів – приблизно в 2,6 раза (з ~18 млн т до 7 млн т CO_2 на 10 млн т сталі) [19]. У перспективі, поєднання водневої металургії з відновлюваною електроенергетикою дозволить наблизити викиди до нуля, проте вимагає вирішення проблеми нестабільності генерації (сонця, вітру) та накопичення енергії. Міжнародний досвід (пілотні проекти у Швеції, Німеччині) підтверджує технічну здійсненність цього шляху, але питання економіки залишається відкритим.

Електропічне виробництво на брухті (розширення EAF). Збільшення частки металобрухту в сировинному балансі – один з найпростіших способів знизити як енерговитрати, так і викиди**.** Переплавка брухту вимагає значно менше енергії, як зазначалося (близько 1/8 енергії порівняно з рудою) [16], і практично не використовує викопного вуглецю. Тому багато країн нарощують потужності EAF; у світі частка цього маршруту вже перевищила 26% від загального виробництва сталі (2020) і продовжує зростати. США, Італія, Туреччина виробляють більшість сталі саме з брухту. В Україні ж історично домінувала аглодоменна технологія, але в останні роки також введено в експлуатацію нові дугові печі (наприклад, на

«Інтерпайп Сталь» у 2012 р.), що відображає світову тенденцію. Розширення EAF знижує сумарне споживання первинної енергії, але підвищує попит на електроенергію – це вимагає відповідного розвитку енергомереж і генерації.

Замінники вуглецевого палива. Часткове заміщення коксу та природного газу альтернативними енергоносіями вже випробовується. Один із напрямів – використання біомаси (біококсу, деревного вугілля) у доменних печах і агломерації. Деякі європейські домни вводять до шихти певний відсоток біовугілля, що зменшує викопний вуглець у процесі. Вплив на енергобаланс при цьому невеликий (теплотворна здатність біомаси близька до вугілля), але є обмеження в масштабах через доступність біосировини. Інший шлях – інтеграція відновлюваної електрики через електротермічні процеси: наприклад, плазмові нагрівачі для підігріву повітря або застосування електролізерів для отримання реагентів. Ці технології, будучи допоміжними, поки не дають революційного зниження енерговитрат, але сприяють зниженню вуглецевого сліду.

Уловлювання та утилізація CO_2 (CCUS). Технології Carbon Capture, Utilization and Storage можуть застосовуватися на металургійних об’єктах для вилучення CO_2 з доменних або конвертерних газів. Вони безпосередньо не скорочують споживання енергії, а навпаки дещо його підвищують (необхідна енергія для роботи систем уловлювання, стиснення CO_2 тощо). Проте CCUS дозволяє досягти різкого зменшення викидів там, де повністю відмовитися від коксу поки нереально [23]. Впровадження CCS на сталеливарному заводі може споживати ~1-2 ГДж додаткової енергії на тонну сталі, що треба враховувати економічно. Деякі проекти розглядають переробку уловленого CO_2 (CCU) – наприклад, для виробництва синтетичного палива (метанолу) або використання в харчовій промисловості [23]. Це потенційно створює побічні продукти і може частково компенсувати витрати, але такі схеми поки що на ранніх стадіях розвитку.

Загалом, низьковуглецеві технології в металургії часто ведуть до підвищення електроємності процесів. Метал виробляється з меншим викопним паливом, але

потребує більше електроенергії та капіталовкладень. Тому критично важливо розглядати ці інновації комплексно – з урахуванням наявності дешевої низьковуглецевої електрики, можливостей електромереж та економічних стимулів (квот на викиди, податків на CO_2 тощо). Міжнародний досвід наразі показує, що країни ЄС, Японія, Південна Корея роблять ставку на водень і EAF, Китай активно експериментує з технологіями уловлювання та підвищення частки брухту, тоді як США і розвинуті економіки вже багато років мають високу частку електросталі і продовжують удосконалювати енергоефективність цього маршруту.

1.1.5 Економічний аспект енергоспоживання

Вартість енергії є визначальним фактором конкурентоспроможності металургії. За даними World Steel Association, енергоносії формують 20–40% собівартості виробництва сталі [11]. Отже, навіть невелике підвищення енергоефективності прямо знижує витрати на виробництво і підвищує прибутковість. Підприємства, які впроваджують енергозберігаючі проекти, можуть досягти суттєвої економії: так, енергоощадні заходи часто окупаються за 1–3 роки за рахунок зменшення рахунків за паливо й електрику. Крім того, енергоефективність тісно пов’язана з екологічними платежами – менше споживання палива означає менше викидів CO_2 і, відповідно, нижчі витрати на квоти чи податки в рамках екологічного регулювання. Ціна енергоресурсів на ринках впливає на металургів глобально. 2021–2022 роки стали випробуванням для європейської галузі: стрімке зростання цін на газ та електроенергію призвело до зупинки частини сталеплавильних потужностей в ЄС [24]. Наприклад, восени 2022 р. витрати на енергію для деяких заводів зросли настільки, що місячний рахунок за енергію зрівнявся з річним у попередні роки [24]. Компанії були змушені

скорочувати виплавку до 50% від потужності або тимчасово зупиняти електропечі [24]. Це викликало кризу пропозиції на ринку сталі та підвищення імпортної залежності Європи [24]. Таким чином, надвисокі ціни на енергоносії можуть стати екзистенційною загрозою для металургії навіть у розвинених країнах.

В Україні війна та обстріли енергетичної інфраструктури в 2022 році також спричинили дефіцит електроенергії, що змусило металургійні заводи тимчасово зупинятися і працювати за квотами споживання, впроваджуючи жорсткий режим енергозбереження [12]. Ці екстремальні ситуації показують важливість стабільного енергозабезпечення та гнучкості виробництва до цінових шоків.

Інвестиції в енергоефективність та нові технології потребують значних коштів, але окупаються довгостроково через економію та “зелені” бонуси. За оцінками китайських дослідників, до 2030 року технічні заходи з підвищення енергоефективності в сталеливарній промисловості Китаю мають середню питомую вартість ~27 юанів за тонну у перерахунку на зменшення викидів, тоді як перехід на нові виробничі структури (наприклад, масовий перехід на електропечі або водневі технології) обійдеться набагато дорожче – ~703 юаня на тонну у вигляді граничних витрат [25]. Висока капіталоємність нових технологій є серйозним бар’єром для їх впровадження [25]. Саме тому багато компаній і країн виважено підходять до декарбонізації: спочатку максимально реалізують дешевші заходи енергоефективності, і лише тоді – дорогі трансформаційні проекти. Економічний аналіз свідчить, що без додаткових стимулів (дешеві кредити, субсидії, доходи від торгівлі вуглецевими квотами) бізнес може відкладати впровадження радикально нових технологій [25]. Включення металургії до системи торгівлі викидами та посилення екологічних вимог покликані вирівняти цю ситуацію, зробивши енергоефективні та низьковуглецеві технології економічно вигіднішими.

Водночас, енергоменеджмент стає частиною бізнес-стратегії металургійних компаній. Підприємства запроваджують стандарти ISO 50001, формують портфелі енергозберігаючих проектів, оцінюють їхню рентабельність. Деякі українські

науковці пропонують методики управління такими проектами та адаптивного планування енергоспоживання на підприємствах [26,27], що дозволяє науково обґрунтувати інвестиції в енергоефективність. Економія енергії розглядається не лише як спосіб знизити витрати, а і як засіб зменшити ризики волатильності цін та виконати екологічні нормативи. Таким чином, енергоспоживання в металургії – це не лише технічний, але й економічний виклик: оптимальне управління енергією прямо впливає на фінансові результати і стійкість підприємств.

Огляд літератури останніх п’яти років свідчить, що енергоспоживання в металургійній промисловості залишається у центрі уваги науковців і практиків. Галузь, будучи однією з найбільш енергоємних, стикається з подвійним викликом – підвищувати ефективність використання енергії задля зниження витрат і одночасно трансформуватися для зменшення вуглецевого сліду. Міжнародний досвід показує суттєвий прогрес у впровадженні енергоефективних технологій: від утилізації тепла і модернізації обладнання до цифрових систем керування. У результаті вдалося помітно знизити питомі енерговитрати на традиційну продукцію. Паралельно, ведуться роботи над проривними технологіями (H_2-металургія, електроплавка руди, CCUS), які в перспективі змінять енергетичний баланс галузі, перевівши її на рейки електрифікації та відновлюваної енергії. Ці зрушення вже починають впливати: з’являються нові вимоги до енергосистем (забезпечення великих обсягів «зеленої» електрики), змінюються структури витрат підприємств, формується нова економіка металургії, де кВт·год стає такою ж важливою «сировиною», як руда чи вугілля. Українські та зарубіжні публікації одностайні в тому, що підвищення енергоефективності – це шлях до підсилення конкурентних позицій металургії на світовому ринку [11], а зниження енергозалежності – запорука її стійкості перед зовнішніми шоками. В підсумку, сталий розвиток металургійної промисловості неможливий без оптимізації енергоспоживання – як через впровадження передових технологій, так і завдяки зваженій економічній політиці та міжнародній співпраці у цій сфері.

1.2. Поняття енергоефективності та показники її оцінки

Металургійна промисловість належить до найбільш енергоємних секторів: на неї припадає близько 8% кінцевого світового споживання енергії [28] та приблизно 21–24% промислових викидів CO_2 [29]. Виробництво сталі особливо енергоінтенсивне – енергія й сировина складають до 60–80% собівартості продукції [30]. Глобальний випуск сталі за останні 20 років подвоївся [31], що призвело до еквівалентного зростання споживання енергії і викидів. Попри певне зниження енергоємності виробництва сталі, ці покращення не встигають за зростанням попиту [32].

Дослідження показують, що з 1900 року питомі витрати енергії на тонну сталі зменшилися приблизно на 67% завдяки підвищенню ефективності процесів [33]. Проте з середини 1990-х темпи глобального підвищення енергоефективності фактично стагнують – зокрема, через бурхливе зростання виробництва в країнах із менш ефективними технологіями [33]. Тому енергоефективність у металургії нині є пріоритетом як з економічної точки зору (зниження витрат виробництва), так і з екологічної (скорочення викидів парникових газів). Нижче представлено аналітичний огляд основних показників енергоефективності металургії, сучасних технологій її підвищення та міжнародного досвіду впровадження таких рішень у галузі металургії.

1.2.1 Основні показники енергоефективності в металургії

Головним інтегральним показником енергоефективності металургії є питоме енергоспоживання на одиницю продукції, наприклад, гігаджоулі на тонну

виплавленої сталі (ГДж/т). За останні десятиліття світова металургія досягла значного прогресу: згідно з даними World Steel Association, завдяки впровадженню енергоощадних технологій середні енерговитрати на виробництво 1 тонни сталі знизилися приблизно на 60% у порівнянні з 1960 роком [11]. Станом на середину 2010-х глобальна середньозважена енергоємність виробництва сталі оцінювалася на рівні ~17,6 ГДж/т [34,35]. Цей показник варіюється залежно від технологічного маршруту та країни. Приміром, країни з високою часткою електросталеплавильного виробництва (EAF) демонструють нижчу середню енергоємність: Італія та Іспанія мали одні з найнижчих показників у світі, тоді як Китай – один із найвищих [34]. Причина – в частці переробки брухту: в Італії та Іспанії значна частка сталі виплавляється в електродугових печах, тоді як у Китаї переважають доменні печі [34, 35].

Світове виробництво сталі більш ніж подвоїлося в період з 2000 по 2018 рік (Рисунок 2.1).

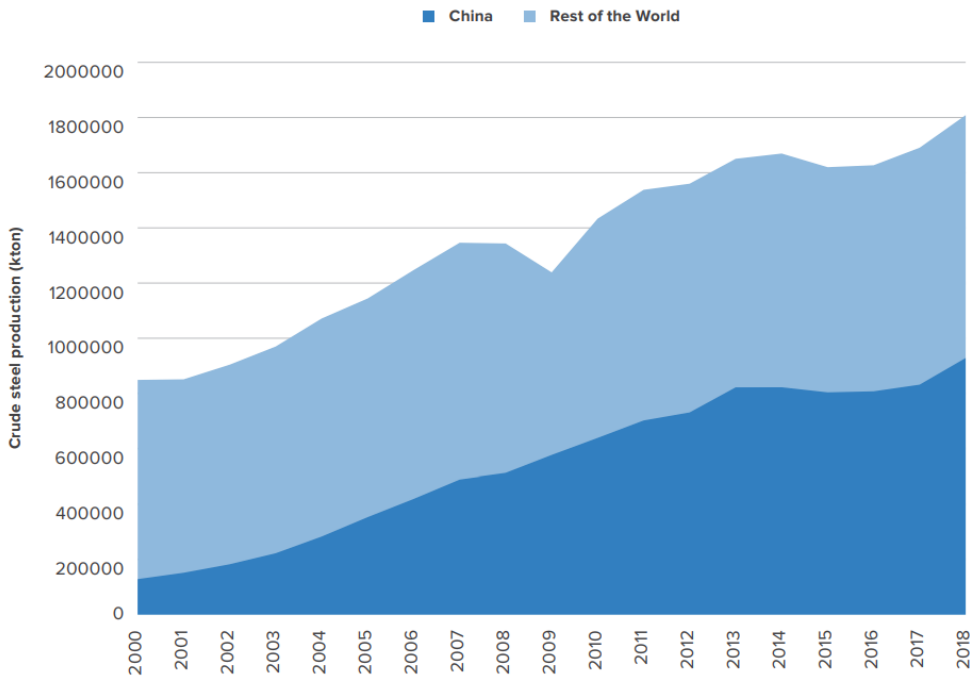


Рисунок 2.1 Виробництво нерафінованої сталі в Китаї та решті світу, 2000-2018 (Worldsteel 2018 [35], 2019a [36])

Графік відображає динаміку виробництва нерафінованої сталі у Китаї та решті світу в період з 2000 по 2018 рік. Його структура чітко демонструє суттєве зростання світового виробництва сталі, а також значну зміну ролі Китаю в цій галузі. У 2000 році загальний обсяг виробництва сталі становив трохи більше 800 мільйонів тонн, при цьому Китай займав лише невелику частину від загального обсягу. Однак уже з початку 2000-х років спостерігається стрімке зростання китайського виробництва. Його частка в загальному обсязі помітно збільшується, що є наслідком активної індустріалізації та урбанізації Китаю.

У період з 2000 по 2007 рік виробництво сталі у світі неухильно зростало, що свідчить про глобальне економічне піднесення. Проте в 2008 році відбувся різкий спад, що співпадає з глобальною економічною кризою. Це зниження виробництва сталі спостерігається переважно у решті світу, тоді як Китай продовжує повільне зростання, хоч і з деяким уповільненням.

Після 2009 року відновлення світового виробництва відбувається досить швидкими темпами, причому основний внесок у це робить Китай. До 2014 року китайське виробництво сталі зростає до рівня, що перевищує 800 мільйонів тонн, тоді як у решті світу виробництво залишається приблизно стабільним.

Помітний спад у 2014 році може бути пов’язаний з економічним уповільненням у Китаї, а також із заходами уряду щодо боротьби з надлишковими потужностями та закриття застарілих і нелегальних виробничих потужностей. Однак після цього Китай знову демонструє поступове зростання, і до 2018 року загальний обсяг виробництва сталі у світі перевищує 1,8 мільярда тонн.

З графіка можна зробити кілька важливих висновків. По-перше, Китай став абсолютним лідером у виробництві сталі, і його вплив на світову металургійну галузь є визначальним. По-друге, глобальне виробництво сталі значною мірою залежить від економічних циклів, що добре видно на прикладах кризових періодів 2008 і 2014 років. І нарешті, хоча решта світу демонструє певне зростання, темпи

цього збільшення значно поступаються китайським, що підкреслює домінуючу роль Китаю в глобальному виробництві сталі.

У 2018 році Китай становив 51 відсоток світового виробництва сталі, тоді як у 2000 році його частка була лише 15 відсотків. Спад виробництва сталі у 2008 році був спричинений глобальною економічною рецесією. Спад у 2014 році був здебільшого зумовлений уповільненням зростання китайської економіки та хронічним надлишковим виробничим потенціалом, що призвело до закриття незаконних індукційних печей і старих металургійних заводів у Китаї.

Наприклад, США виробляють ~70% сталі через електродугові печі, тому їхній середній показник енергоємності приблизно на третину нижчий, ніж у Китаї.

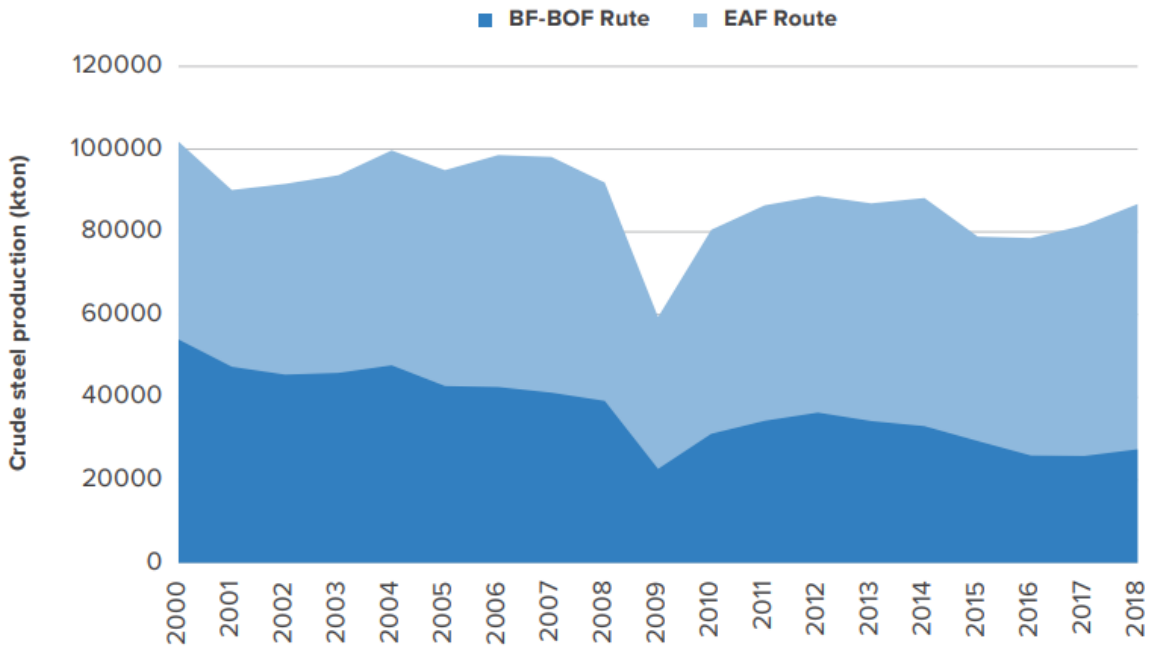


Рисунок 2.2 Виробництво нерафінованої сталі у США за виробничими маршрутами, 2000-2018 (Worldsteel 2018 [35], 2019a [36])

Упродовж 2000-2018 років виробництво нерафінованої сталі у США зазнало значних змін, що відображено на цьому графіку. Вже на початку 2000-х років було помітно, що американська металургійна промисловість спирається на два основних маршрути виробництва: BF-BOF (доменна піч – киснево-конвертерний метод) та

EAF (електродугова піч). Хоча обидва процеси активно використовувалися, саме традиційний метод BF-BOF займав більшу частку виробництва, поступово поступаючись місцем більш сучасному EAF.

У перші роки досліджуваного періоду виробництво сталі залишалося відносно стабільним, тримаючись на рівні близько 100 мільйонів тонн. Однак у 2008 році сталося те, що назавжди змінило не лише сталеливарну галузь США, а й економіку світу загалом – глобальна фінансова криза. Попит на сталь різко впав, що спричинило стрімке скорочення виробництва. Особливо постраждав сегмент BF-BOF, який потребує значних капіталовкладень і довготривалих процесів виплавки. У цей період виробництво сталі в США опустилося до найнижчого рівня за два десятиліття.

Однак, як і будь-яка інша галузь, металургія поступово почала відновлюватися. Починаючи з 2010 року, виробництво знову зросло, хоча докризового рівня досягти вже не вдалося. Проте цей період став визначальним для структурних змін у галузі. Все більше підприємств почали переходити на електродугові печі (EAF), які є більш гнучкими, економічно вигідними та екологічно безпечнішими. Саме завдяки цьому методу відбулося подальше відновлення виробництва в США, хоча воно залишалося на дещо нижчому рівні, ніж на початку 2000-х.

Протягом останніх років досліджуваного періоду, з 2015 по 2018 рік, галузь знову увійшла у відносно стабільний ритм. BF-BOF метод продовжував поступово втрачати свої позиції, тоді як EAF впевнено закріплювався як основний спосіб виробництва сталі. Це стало своєрідним відображенням глобальних тенденцій у сталеливарній промисловості: компанії надавали перевагу технологіям, що дозволяли швидше адаптуватися до ринкових змін.

Важливими індикаторами є також питоме споживання палива за технологічними переділами та ККД використання енергії. Первинне виробництво сталі (з руди) здійснюється в основному через зв’язку «доменна піч – кисневий

конвертор» (маршрут BF-BOF) або шляхом прямого відновлення заліза з наступним плавленням в електропечі (DRI-EAF). Вторинне виробництво – переплав брухту в електродуговій печі. Ці маршрути суттєво різняться за енергоємністю. Маршрут BF-BOF споживає в середньому ~18–20 ГДж/т сталі (більшість енергії з коксівного вугілля), тоді як маршрут EAF (на брухті) – у кілька разів менше. За оцінками, виплавка сталі з брухту потребує лише ~1/4–1/3 енергії порівняно з виробництвом із залізної руди [38].

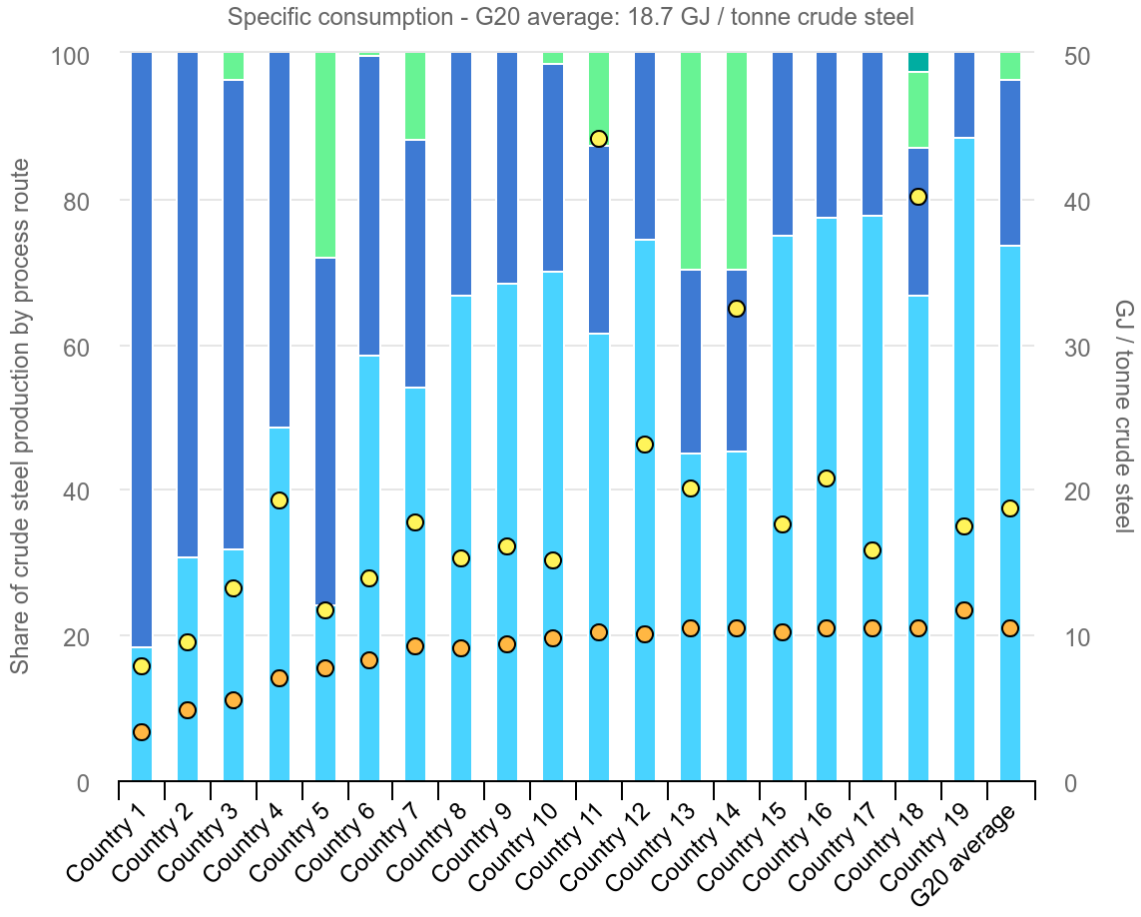


Рисунок 2.3 Кінцеве споживання енергії та енергоємність при використанні найкращих доступних технологій, 2018

Цей графік відображає кінцеве споживання енергії та енергоємність виробництва нерафінованої сталі в різних країнах G20 за 2018 рік. Він показує,

якою мірою використовуються різні технологічні процеси виробництва сталі, а також скільки енергії витрачається на тонну готової продукції.

На вертикальній осі зліва представлена частка виробництва сталі за технологічними маршрутами, а справа – споживання енергії в гігаджоулях (GJ) на тонну сталі. Кожен стовпчик складається з різнокольорових сегментів, що відповідають різним технологіям виплавки сталі. Жовті точки вказують на середню енергоємність у кожній країні.

Головний висновок із графіка полягає в тому, що структура виробництва сталі та рівень її енергоємності значно різняться між країнами. Деякі країни домінують у використанні енергоефективних технологій, тоді як інші продовжують покладатися на більш традиційні, але менш ефективні методи.

Виробництво сталі – одна з ключових галузей промисловості, але вона також є однією з найбільш енергоємних. Цей графік яскраво демонструє, наскільки різниться споживання енергії у країнах G20 у 2018 році та як використовувані технології впливають на ефективність виробництва.

З перших же погляду стає зрозуміло, що у різних країнах застосовуються різні виробничі маршрути. У деяких державах переважає електродугове плавлення сталі (EAF) – технологія, що дозволяє суттєво зменшити енерговитрати. В інших країнах домінує традиційний киснево-конвертерний процес (BF-BOF), що вимагає набагато більше енергоресурсів. Саме це пояснює суттєві коливання рівня енергоємності, який позначено жовтими точками. В одних країнах ці показники тримаються на рівні нижче середнього значення G20 (18,7 GJ на тонну сталі), тоді як в інших значно перевищують цей поріг.

Один із найцікавіших моментів – помітна відмінність між країнами, які впроваджують передові технології, та тими, хто поки що залишається на застарілих виробничих процесах. Держави, які інвестували в модернізацію, вже зараз отримують вигоду, скорочуючи витрати енергії та, відповідно, зменшуючи витрати на виробництво. У той же час ті країни, які все ще значною мірою покладаються на

класичні доменні печі, витрачають більше енергоресурсів, що робить їхню металургію менш конкурентоспроможною в умовах сучасного ринку.

Графік також натякає на майбутні тренди. Стає очевидним, що металургійна промисловість рухається в напрямку більш енергоефективних рішень. Якщо зараз у деяких країнах EAF вже домінує, то через кілька десятиліть цей метод може повністю витіснити традиційні способи виплавки сталі. Крім економічної вигоди, це також означає зменшення негативного впливу на довкілля.

Вторинна переробка економить до 60–70% енергії на тонну [40] (за деякими даними – до 1/8 від витрат енергії при первинному циклі [41]). У реальних умовах все нове виробництво сталі містить певну частку брухту (у кисневих конверторах до ~30% металу може бути брухтом) [40], але ключовим фактором енергоефективності галузі є саме частка маршруту EAF. Наразі близько 25% світової сталі виплавляється у електропечах [11], тоді як ~75% все ще припадає на більш енергоємний доменний процес. Таким чином, підвищення частки електросталеплавильного виробництва є одним з основних резервів енергоефективності на галузевому рівні. У той же час показники енергоефективності залежать і від рівня технологій на кожному переділі. Наприклад, найкращі доступні технології (НДТ) забезпечують витрати ~14,8 ГДж/т для маршруту BF-BOF та ~2,6 ГДж/т для маршруту EAF на брухті (тонкий сляб) за оцінками Lawrence Berkeley Lab [42]. Порівняння фактичних показників різних країн з еталонами НДТ дозволяє оцінити потенціал підвищення ефективності. Згідно з міжнародним бенчмаркінгом, багато країн G20 ще можуть економічно скоротити енерговитрати сталевого виробництва на 10–20%, наближаючись до рівня НДТ [39]. Отже, ключові показники для відстеження енергоефективності металургії включають: питомі витрати палива й електроенергії на тонну (в розрізі технологій), частку вторинної металургії, а також інтегральний індекс ефективності відносно найкращих світових практик.

1.2.2 Сучасні енергоефективні технології у металургії

Зниження енергоспоживання досягається як шляхом модернізації обладнання, так і впровадженням нових процесів та систем управління. Розглянемо основні технологічні напрямки підвищення енергоефективності металургійних заводів:

Відновлення втратного тепла та когенерація. В металургійному циклі значна частина тепла вивільняється з технологічними газами та розжареними матеріалами. Сучасні заводи впроваджують системи утилізації цього тепла для отримання корисної енергії. Наприклад, коупрудутні гази доменного і коксохімічного виробництва замість спалювання в факелах спрямовуються на виробництво пари і електроенергії, покриваючи понад 60% внутрішніх енергопотреб комбінату [11]. На багатьох інтегрованих комбінатах діють власні теплоелектроцентралі, що працюють на доменному та коксовому газі – таким чином, одночасно генерується і електрика, і технологічний пар/гаряча вода. Ця когенерація суттєво підвищує загальний ККД використання палива: сучасні установки когенерації досягають 65–80% ефективності, тоді як роздільне отримання електрики на ТЕС та технологічної пари має сумарний ККД близько 50% [43]. До ефективних технологій утилізації тепла належить, зокрема, суха гасіння коксу (CDQ) – коли розжарений кокс із печі гаситься не водою, а інертним газом, що дозволяє відібрати його тепло для отримання пари. Інша перевірена технологія – турбіни утилізації димового тиску (TRT) на доменних печах, де енергія газу, що виходить під тиском, перетворюється на електроенергію. Такі рішення впроваджено практично на всіх сучасних доменних печах Японії і широко застосовуються в ЄС та Китаї [44]. Додатково, теплоту відхідних газів агломераційних машин, сталеплавильних печей і прокатних станів усе частіше відбирають через теплообмінники для подальшого використання (підігрів повітря, води, виробництво пари чи навіть електрики через органічний

цикл Ренкіна). У сукупності системи рекуперації тепла здатні знизити питомі витрати палива на 10–20% і заощадити значні кошти. Характерно, що багато з таких заходів мають відносно невеликий строк окупності. За даними програм енергоаудиту DOE США, більшість рекомендацій з енергозбереження на сталеливарних підприємствах мають окупність до 2 років, а майже 40% заходів – менш ніж 9 місяців [45]. Це пояснює, чому утилізація тепла і когенерація стали стандартом на сучасних меткомбінатах: вони не тільки підвищують ефективність, але й швидко дають економічний ефект у вигляді зниження енерговитрат.

Енергоефективні процеси виплавки металу. Радикальна різниця у витратах енергії між традиційним доменним циклом та виплавкою сталі з брухту обумовила технологічні зрушення в галузі. Електродугові печі (EAF) нині розглядаються як ключова енергоефективна технологія, особливо у поєднанні з використанням брухту. Повний цикл виробництва 1 тонни сталі в EAF може споживати в середньому на 60–70% менше енергії, ніж у доменній печі з конвертером [38]. Це підтверджується практикою: країни, що мають високий рівень електросталеплавильного виробництва (наприклад, Туреччина чи США), досягають суттєво нижчих показників енергоємності на рівні галузі [46]. Однак метод EAF обмежений наявністю сталевого брухту, запаси якого не безмежні (глобально збирається ~85% утворюваного брухту) [47]. Тому для покриття попиту все одно потрібне первинне виробництво заліза.

Для підвищення ефективності останнього впроваджуються такі технології, як пряме відновлення заліза (DRI) з використанням природного газу або водню замість коксу. Процес DRI з подальшим плавленням заліза в електропечі дозволяє замінити частину доменного виробництва; його енергоефективність залежить від виду палива: при використанні природного газу питомі витрати енергії можуть бути дещо нижчими, ніж у доменному маршруті, хоча загалом DRI-EAF все ще споживає близько 16–18 ГДж/т (лише трохи менше за BF-BOF) [42]. Основна перевага DRI – зниження викидів CO_2 при використанні газу або водню, тому багато країн

Близького Сходу, що мають дешевий газ, обрали цей шлях (наприклад, ~100% сталі Єгипту історично вироблялося через DRI-EAF) [42]. Для доменного ж процесу ключові підходи до підвищення енергоефективності включають модернізацію печей та допоміжного обладнання: вдування пиловугільного палива (PCI) замість частини коксу, використання гарячого дуття максимальної температури, очищення та рецикл доменного газу, ефективніші повітронагрівники тощо.

Сучасні доменні печі в Японії та Кореї досягли настільки високого рівня термічної ефективності, що подальше зниження витрат енергії є близьким до теоретичних меж процесу [47]. Тому в довгостроковій перспективі проривні технології (такі як відновлення заліза воднем, електропічна плавка залізорудних окатків, плазмові або електролізні методи) розглядаються як шлях до кардинального покращення енергоефективності і декарбонізації галузі [47].

Наразі ці технології перебувають на стадії дослідно-промислових випробувань, і очікується їх комерційне впровадження ближче до 2030-х років [47]. Отже, з точки зору доступних зараз рішень, металургійні компанії зосереджуються на максимальному використанні брухту, переході на електропечі там, де це можливо, а також на модернізації діючих доменних агрегатів до рівня найкращих світових стандартів енергоефективності.

Цифровізація та системи енергоменеджменту. Останніми роками значна увага приділяється використанню цифрових технологій для оптимізації енергоспоживання в промисловості. Сталеві заводи впроваджують системи моніторингу та керування, що в режимі реального часу відстежують параметри роботи печей, прокатних станів, моторів та інших споживачів енергії. Сучасні програмні комплекси – Advanced Process Control, цифрові двійники, штучний інтелект – дозволяють тонко керувати процесами, мінімізуючи непродуктивні витрати палива й електрики [48].

Наприклад, за допомогою AI-моделей можна оптимізувати тепловий режим електродугової печі або доменної печі, щоб досягати необхідної температури з

найменшими витратами коксу чи електроенергії. У Європі реалізуються спеціальні проекти, присвячені цифровій трансформації металургії. Так, у 2024 р. стартував проєкт DIGREEs за підтримки ЄС, у рамках якого 12 партнерів (наукові установи та виробники сталі) розробляють цифрову платформу з мережевими датчиками та AI для оптимізації повного циклу виробництва – від підготовки сировини до прокату [48]. Очікується, що впровадження цифрових двійників і моделей керування на європейських меткомбінатах може в середньостроковій перспективі скоротити споживання енергії настільки, що це дасть економію до €800 млн щорічно і зменшить викиди CO_2 на 6 млн т/рік [48].

Окрім спеціалізованих проектів, багато підприємств уже застосовують елементи Industry 4.0: системи диспетчеризації енергоспоживання, предиктивну аналітику для обладнання (щоб запобігти аваріям і нештатним простоям), оптимізацію графіків роботи агрегатів для згладжування пікових навантажень тощо.

Важливим компонентом є запровадження систем енергетичного менеджменту (EnMS) відповідно до стандарту ISO 50001. Як зазначає MEA, формалізований енергоменеджмент дозволяє забезпечити підтримання передових практик на постійній основі при невеликих витратах [38]. Компанії, сертифіковані за ISO 50001, регулярно аналізують свої енерговитрати, мають показники EnPI та плани з енергоефективності, що сприяє виявленню нових можливостей економії.

У комплексі цифрові рішення та енергоменеджмент можуть дати додаткове 5–10% зниження питомого енергоспоживання на сталевих підприємствах за рахунок «тонкого налаштування» процесів і усунення втрат. Таким чином, цифровізація виступає важливим технологічним чинником підвищення енергоефективності, доповнюючи собою апаратні модернізації.

1.2.3 Міжнародний досвід впровадження енергоефективних технологій.

Багаторічна практика провідних металургійних країн світу демонструє, що підвищення енергоефективності є взаємовигідним процесом – воно знижує витрати виробників і одночасно допомагає досягати екологічних цілей. Розвинені країни вже мають успіхи у зменшенні питомих енерговитрат, проте потенціал для покращення залишається практично в усіх регіонах [38]. За даними МЕА, якщо впровадити на всіх підприємствах світу доступні на ринку енергоефективні технології, то можна заощадити до ~20% енергії на тонну сталі в середньому [38].

Нижче розглянемо досвід окремих країн та глобальних ініціатив:

Японія традиційно є лідером у енергоефективності чорної металургії. Починаючи з нафтової кризи 1970-х, японські металурги системно впроваджували енергозберігаючі ноу-хау – від тотальної утилізації газів і тепла до вдосконалення доменних технологій. У результаті японські сталеплавильні заводи досягли найвищої в світі енергоефективності [49]. Ще у 2010-х Японія заявила про намір покращити ефективність виробництва сталі на 35% до 2030 р. порівняно з базовим рівнем, що свідчить про прагнення рухати планку ще вище [50]. Для поширення найкращих практик Японія ініціювала програму глобального бенчмаркінгу енергоефективності під час головування в G20 у 2019 р. [38]. У співпраці з МЕА розроблено міжнародну методику порівняння питомого енергоспоживання на тонну сталі з урахуванням структури виробництва, і виявлено, що за рахунок оптимізації процесів та впровадження НДТ багато країн можуть значно скоротити розрив до лідерів [38]. Японські підприємства також активно передають технології: через механізми спільного впровадження та партнерства вони допомагають встановлювати обладнання для рекуперації тепла, удосконалені доменні фурми, системи автоматизації на заводах у Китаї, Індії, АСЕАН.

Європейський Союз приділяє увагу енергоефективності промисловості на рівні політик. Директива ЄС з енергоефективності (EED) зобов'язує держави-члени стимулювати підвищення ефективності, зокрема через енергоаудити великих підприємств та підтримку високоефективної когенерації [51]. Для металургії в ЄС діють Галузеві довідники НДТ (BREF) – наприклад, документ «Iron & Steel BREF» визначає найкращі технічні засоби мінімізації енерговитрат, які поступово впроваджуються на металургійних комбінатах. Багато європейських заводів модернізовано за рахунок державних програм та фондів (Horizon 2020, Innovations Fund тощо), що співфінансують встановлення енергоефективних агрегатів. Приміром, у ЄС широко реалізовані такі технології, як сухе гасіння коксу, регенеративні пальники в печах нагрівання зливків, частотні приводи на електродвигунах прокатних станів тощо. Німеччина та Франція активно підтримують проекти з цифровізації метвиробництва (як-от зазначений DiGreeS), спрямовані на скорочення енерговитрат. У результаті цих зусиль показники енергоємності європейської сталевої продукції одні з найнижчих у світі. Наприклад, середній сталеплавильний завод у Німеччині чи Італії споживає значно менше енергії на тонну, ніж середній китайський, завдяки вищій частці EAF та впровадженим НДТ [52]. Водночас ЄС продовжує стимулювати подальше зменшення витрат палива й перехід на електричні та водневі технології в межах ініціатив Green Deal і програми декарбонізації важкої промисловості.

США мають дещо іншу структуру металургії – переважання міні-заводів з електроплавкою брухту. Станом на останні роки близько 70% сталі в США виплавляється в EAF, що забезпечує нижчу середню енергоємність галузі (США входять до топ-5 найефективніших за цим показником) [44]. Уряд США історично підтримує енергоефективність через програми Департаменту Енергетики. У 2000-х діяв проєкт Save Energy Now, в рамках якого на багатьох сталеливарних підприємствах проведено енергоаудити і виявлено можливості економії енергії на десятки мільйонів доларів [45]. Як зазначалося, значна частина цих заходів мала

окупність менше 2 років [45], що спонукало заводи впроваджувати їх. У США також діє програма ENERGY STAR for Industry, що видає галузеві керівництва з найкращих практик (у т.ч. для металургії) та відзначає найбільш ефективні підприємства. Великий акцент робиться на модернізації енергетичного обладнання – заміні старих котлів, компресорів, електродвигунів на високоефективні. За оцінками дослідження BlueGreen Alliance (2021), загальна енергоємність сталевого сектору США приблизно на 33% нижча, ніж у Китаї, хоч американські доменні заводи не є найсучаснішими (середній вік кисневих конверторів в США перевищує 30 років) . Таким чином, приклад США демонструє ефективність поєднання високої частки переробки брухту з урядовою підтримкою енергоощадних заходів на діючих підприємствах.

Китай як найбільший виробник сталі (більше 50% світового обсягу) одночасно є і найбільшим споживачем енергії в металургії [52]. Протягом 2000–2010-х років Китай здійснив модернізацію галузі: було закрито тисячі дрібних низькоефективних печей і введено в стрій нові великі доменні та конвертерні агрегати. Понад 80% потужностей BF-BOF Китаю побудовано після 2000 р., багато з них одразу оснащені сучасними технологіями (утилізація газу, PCI, автоматизація) [45]. Це призвело до того, що питомі витрати енергії на великих китайських комбінатах наблизились до рівня розвинених країн. За даними міжнародного бенчмаркінгу, енергоефективність саме киснево-конвертерного маршруту в Китаї – одна з найвищих (2-ге місце серед 15 країн) [45]. Водночас загальний середній показник по Китаю гірший через низьку частку EAF (менше 10% історично). Китайський уряд це усвідомлює і ставить цілі підвищити частку EAF. Новий План дій КНР на 2024–2025 роки передбачає збільшення частки електросталі до 15% загального випуску і доведення рівня використання брухту до 300 млн т на рік [53]. Також до 2025 р. щонайменше 30% металургійних потужностей Китаю мають досягти еталонних показників енергоефективності, а менш ефективні – модернізовані або ліквідовані [53]. Китай запровадив нормативні вимоги, що всі

нові та реконструйовані сталеливарні проекти повинні відповідати найвищим критеріям енергоефективності і екологічним стандартам (т.зв. стандарти A-level) [53]. Крім того, діють програми фінансового стимулювання: пільгові кредити на «зелені» технології, субсидії на встановлення обладнання для утилізації тепла, а також жорсткі обмеження на додаткове споживання енергії (квоти) для підприємств. У результаті цих заходів енергоємність китайської металургії поступово знижується. Проте викликом залишається швидке зростання попиту на сталь на внутрішньому ринку, що поки що перевищує темпи впровадження енергоефективних технологій [33]. Китайський досвід демонструє важливість державної політики: цільові показники та адміністративні обмеження здатні спрямувати навіть настільки велику галузь на більш ефективний шлях розвитку.

Інші країни та глобальні ініціативи. Індія як другий за обсягами виробник сталі теж стикається з високою енергоємністю (серед найвищих у світі поруч із Китаєм та Україною) [52], бо покладається на доменне і вугільно-доменне виробництво (в т.ч. DRI на вугіллі). Індія почала впроваджувати політику енергоефективності: програма PAT (Perform, Achieve and Trade) встановлює цільові показники скорочення питомого енергоспоживання для металургійних заводів з можливістю торгівлі сертифікатами економії. Це мотивує підприємства інвестувати в модернізацію (утилізацію тепла, заміну обладнання) або купувати в інших, більш ефективних, якщо не досягають цілей. Україна, традиційно входивши в десятку виробників сталі, на жаль, до війни мала застарілу структуру виробництва (переважно мартенівські печі і Bessemer конвертери до 2010-х, пізніше BF-BOF), і як наслідок – дуже високу енергоємність. За даними міжнародного дослідження, Україна (разом із Китаєм та Індією) демонструвала один із найгірших у світі показників питомих викидів CO_2 та енерговитрат на тонну сталі [52]. Проте повоєнна відбудова галузі розглядається як шанс впровадити найсучасніші технології. Урядові плани відновлення містять наміри будувати нові електросталеплавильні потужності, «зелений» водневий металургійний кластер

тощо, що дозволить кардинально підвищити енергоефективність української металургії і вийти на рівень передових країн [54]. В глобальному масштабі варто відзначити зусилля міжнародних організацій. UNIDO реалізувала ряд проектів з енергоефективності в металургії у країнах, що розвиваються – від Єгипту до В'єтнаму [55] – надаючи експертну підтримку, бенчмаркінгові дослідження та фінансування впровадження НДТ. OECD через структурні підрозділи вивчає політики і механізми скорочення енерговитрат (наприклад, звіти OECD 2019 р. про матеріальну ефективність та декарбонізацію сталеливарної промисловості). Міжнародне енергетичне агентство (МЕА) випустило у 2020 р. Дорожню карту для сталі з акцентом на енергоефективності як фундаменті для досягнення вуглецевої нейтральності [56].

Світовий досвід узагальнено показує: країни, які раніше інвестували в енергоефективні технології (Японія, країни ЄС, Південна Корея, США), нині мають конкурентні переваги і меншу залежність від цін на енергоносії, тоді як ті, що зволікали з модернізацією, тепер змушені здійснювати «стрибок» до сучасних рішень, часто за підтримки міжнародних програм.

1.2.4 Економічний аспект та окупність заходів

Енергоефективність у металургії тісно пов'язана з економікою виробництва. Енергоносії становлять значну частку витрат металургійних підприємств (в середньому 20–40% собівартості сталі [11]), тому будь-яке підвищення ефективності прямо впливає на зниження витрат і підвищення конкурентоспроможності продукції. За оцінками IEA, реалізація доступних енергоощадних технологій може заощадити галузі сотні мільйонів доларів завдяки зниженню питомих витрат палива [38]. Водночас впровадження нових технологій

потребує інвестицій, і рішення про їх прийняття залежить від очікуваної окупності. Більшість «низькосяжних плодів» енергоефективності – оптимізація режимів, утеплення, рекуперація тепла, модернізація допоміжного обладнання – мають відносно короткий період окупності. Як зазначалося вище, майже 2/5 проектів з енергозбереження у сталеливарній промисловості США показували окупність менше року [45], а переважна більшість – до 2 років [45]. Це означає, що вкладення в такі заходи фактично генерують швидкий економічний виграш. Проте є й великі капіталомісткі проекти – наприклад, будівництво нової електропечі взамін доменної печі, впровадження водневої установки або комплексна модернізація киснево-конвертерного цеху – які потребують сотень мільйонів доларів і окупаються протягом десятиліть. Компанії не поспішають інвестувати в них без додаткових стимулів, оскільки чисто ринкових вигод може бути недостатньо при довгому інвестиційному циклі та ризиках (наприклад, волатильність цін на сталь чи енергоносії). Тому роль державних програм стимулювання тут критична. Багато країн впровадили механізми підтримки: податкові пільги на енергоефективне обладнання, пільгові кредити або фонди декарбонізації, пряму фінансову допомогу. В ЄС, наприклад, Директива EED та інші регламенти прямо рекомендують пріоритизувати підтримку високоефективної когенерації на промислових об’єктах [51].

У США нещодавно прийнято законодавчі стимули (Inflation Reduction Act 2022) що включають кредити для скорочення викидів промисловості – фактично це субсидії і на підвищення енергоефективності теж. Окупність окремих технологій варіюється: напрриклад, встановлення частотних приводів на двигуни може окупитися за 1–1,5 роки за рахунок економії електрики, а от система сухого гасіння коксу – дорожчий проект, що може відбити інвестиції за ~5–7 років залежно від цін на електроенергію та вугілля. Державні гранти чи пільги скорочують ефективний строк окупності, роблячи такі проекти привабливішими. Окрім безпосереднього економічного ефекту у вигляді зниження енерговитрат, підвищення

енергоефективності приносить і непрямі вигоди. Зокрема, це підвищення енергобезпеки (менша залежність від зовнішніх постачань палива), зниження екологічних платежів (в умовах, коли викиди CO_2 чи інші забруднення тарифікуються), створення нових робочих місць у сфері виробництва та обслуговування «зелених» технологій [38]. МЕА підрахувало, що інвестиції в енергоефективність промисловості створюють близько 18 робочих місць на $1 млн інвестицій за рахунок розвитку відповідних технологій та сервісів [38]. Таким чином, економічний аспект енергоефективності є комплексним: з одного боку – це зменшення витрат і швидка окупність багатьох заходів, з іншого – потреба в значних інвестиціях для глибокої модернізації та важливість політик і стимулів, що полегшують та пришвидшують такий перехід.

Металургійна промисловість залишається одним із найважливіших споживачів енергії, але водночас і одним з найперспективніших напрямів для енергозбереження. За останні роки накопичено багатий міжнародний досвід підвищення енергоефективності – від модернізації обладнання до впровадження цифрових систем керування. Ключові показники, такі як питомі витрати енергії на тонну сталі, демонструють позитивну динаміку, хоча темпи покращення відрізняються по регіонах. Найбільш успішні країни змогли поєднати технічні новації (утилізація тепла, електропечі, автоматизація) з продуманою державною політикою стимулювання, що дало змогу скоротити енергоємність виробництва сталі до близьких від теоретичного мінімуму рівнів. З іншого боку, значна частина світової металургії все ще працює з показниками далекими від НДТ, тому потенціал економії енергії лишається колосальним. Огляд літератури та звітів показав, що впровадження доступних технологій (когенерація, рекуперація тепла, оптимізація процесів) може знизити витрати палива на 10–20% навіть на сучасних підприємствах [38], а перехід на передові процеси (електроплавка брухту, пряме відновлення, тощо) – на всі 60–70% у порівнянні зі застарілими маршрутами [38].

В таблиці 2.1 наведено приклади технологій підвищення енергоефективності в металургії та міжнародний досвід їх використання

Таблиця 2.1 – Приклади технологій підвищення енергоефективності в металургії та міжнародний досвід їх використання

Технологія та напрям	Суть і приклади	Вплив на енергоспоживання	Міжнародний досвід
1	2	3	4
Утилізація тепла і когенерація (використання вторинних енергоресурсів)	Використання відхідних технологічних газів (доменного, коксового) як палива для ТЕЦ при комбінованому виробництві електроенергії та тепла. – Встановлення утилізаційних котлів для відбору тепла від димових газів печей нагрівання,	Дозволяє використати 60–70% енергії, яка інакше втрачалася б з газами і теплом worldsteel.org – Підвищує сумарний ККД паливного циклу до 65–80% (проти ~45–50% при роздільному виробництві) epa.gov . – Скорочує питомі витрати умовного палива на 10–20%, знижує викиди CO_2.	– Японія, ЄС: практично всі великі комбінати оснащені установками CDQ, TRT, працюють власні ТЕЦ на доменному газі (Японія – 100% доменного газу утилізується). – Китай: швидке впровадження в 2000–2010-х рр., нині >70% доменних печей обладнано TRT, ~30% коксових батарей – CDQ.

	відхідних газів агломерації тощо. – CDQ (суха квенчація коксу): рекуперація до 80% тепла розжареного коксу у вигляді пари. – TRT-турбіни на доменних печах: вироблення електроенергії за рахунок тиску колошникового газу.		– Україна: до війни часткова утилізація (ТЕЦ на газах є, але CDQ не впроваджувалось); плани будувати CDQ на нових батареях при відбудові.
Енергоощадні методи виплавки сталі (перехід на ефективніші процеси)	– Електродугова піч (EAF) на брухті: плавка сталевого брухту електрострумом; сучасні дугові печі оснащені системами	– Вторинна металургія (брухт → EAF) потребує в 3–4 рази менше енергії на 1 т сталі, ніж повний цикл з руди iea.org	– США: ~70% виробництва – EAF, багато міні-заводів (Nucor, SDI) працюють на брухті, мають одну з найнижчих

	допалювання газів, подачі кисню, які підвищують продуктивність і знижують питому витрату електроенергії. – Пряме відновлення заліза (DRI) + EAF: отримання залізорудного продукту (оконцентратів) на основі газу або водню з подальшим розплавленням – заміна доменного процесу. – Модернізація доменного циклу: вдування пиловугільного палива,	. За найкращими оцінками – до 1/8 від енергії порівняно з рудним маршрутом energyefficiencymovement.com energyefficiencymovement.com . – Газове DRI + EAF може дати ~15% економії енергії проти доменного процесу (і ~20–30% менше викидів CO_2). – Модернізований доменний процес (PCI, рекуперація газу) знижує витрати коксу на 20–30% та економить ~1–2 ГДж/т сталі. – Безперервне лиття скорочує витрати палива на нагрів заготовок ~40–50%.	енергоємностей сталі у світі bluegreenalliance.org . – ЄС: ~40–45% сталі – EAF, решта інтегровані комбінати з високим рівнем технологій (PCI, лиття- прокат в комплексі – як на заводі Voestalpine). – Китай: EAF історично <10%, планують підняти до 15% до 2025 china-briefing.com china-briefing.com ; нові доменні печі мають ПКВ, ряд заводів впроваджують установки прямого відновлення

	підвищення температури дуття, збільшення частки брухту в шихті конвертера (до макс. 25–30%). – Безперервне розливання та прокат: перехід від зливків до слябів/блюмів безперервного лиття, міні-заводи, що поєднують лиття і прокат (зменшує потребу в повторному нагріві).		(проекти з використанням водню – Baowu, HBIS). – Японія, Пд.Корея: переважно BF-BOF, але на найсучаснішому рівні (максимальна утилізація газів, ~0,5 т коксу на т чавуну – світовий мінімум).
Цифрові технології та енергоменеджмент	– Встановлення датчиків і систем контролю енергоспоживання на ключових	– Дає змогу знизити непродуктивні втрати енергії, реагувати на відхилення. За оцінками,	– Німеччина, Франція (ЄС): проекти DiGreeS, SIDERWIN та ін. за підтримки ЄС

(оптимізація і управління)	агрегатах; збір Big Data та аналітика для пошуку “вузьких місць”. – Advanced Process Control (APC): програмні комплекси для автоматичного регулювання печей, турбокомпресорів, прокатних станів з метою мінімізувати перевитрати енергії. – Цифровий двійник виробництва: комп’ютерна модель у реальному часі, що дозволяє оптимізувати	впровадження APC та AI-моделей може скоротити споживання палива і електрики на 5–10% без значних капвкладень. – Енергоменеджмент забезпечує підтримання досягнутого рівня ефективності та пошук нових резервів малими коштами iea.org . – Цифрові рішення покращують і інші показники – продуктивність, час простою, які побічно також підвищують енергоефективність (менше перевитрат на брак, простої).	впроваджують цифрові двійники на сталеплавильних і прокатних лініях (очікувана економія €800 млн і 6 млн т CO_2/рік) en.saarstahl.com en.saarstahl.com . – США: великі компанії (ArcelorMittal USA, US Steel) впровадили ISO 50001 і повідомляли про 3–5% зниження енергоспоживання в результаті; використовують AI для прогнозування потреби в паливі на доменних печах. – Китай: нові “розумні” заводи

	технологічні параметри (швидкість продувки конвертера, профіль нагріву тощо) і прогнозувати витрати енергії. – ISO 50001 EnMS: впровадження системи енергоменеджменту на підприємстві (політика, моніторинг показників, постійне поліпшення).		(Baowu Zhanjiang) повністю автоматизовані, система управління оптимізує енергопотоки; держава стимулює цифровізацію як частину програми Made in China 2025.

Енергоефективність тісно пов’язана з конкурентоспроможністю: менші витрати енергії – нижча собівартість і вища стійкість бізнесу до коливань цін. Не менш важливо, що підвищення енергоефективності є невід’ємною частиною декарбонізації металургії. За оцінками, лише за рахунок заходів енергоефективності та підвищення матеріальної ефективності (більше переробки брухту, менше втрат) можна до 2030 р. скоротити викиди сталевої галузі на 15–20% [38], що є вагомим

внеском на шляху до вуглецевої нейтральності. Міжнародна співпраця – обмін найкращими практиками, спільні дослідницькі проекти, глобальні бенчмаркінги – відіграє значну роль у прискоренні прогресу.

В підсумку, досвід різних країн показує, що інвестиції в енергоефективність металургії окупаються як у прямому економічному сенсі, так і через довгострокові вигоди для довкілля та енергетичної безпеки. Для України та інших країн з енергоємною металургією впровадження сучасних енергоефективних технологій є нагальною потребою і водночас шансом для технологічного стрибка, що забезпечить сталий розвиток галузі в майбутньому.

1.3. Методи зниження витрат електроенергії на підприємствах металургійної галузі

Металургійна галузь є однією з найбільш енергоємних сфер промисловості, що споживає значну частку електроенергії у виробничому процесі. Високі витрати на електроенергію є однією з ключових проблем, які потребують вирішення для підвищення економічної ефективності підприємств.

Зниження цих витрат сприяє не лише підвищенню прибутковості підприємств, а й зменшенню екологічного впливу, що особливо важливо у сучасних умовах боротьби зі змінами клімату. Впровадження новітніх технологій та ефективне управління енергоспоживанням є основними напрямами оптимізації виробничих процесів.

Одним із найбільш ефективних способів зниження споживання електроенергії є модернізація обладнання. Впровадження електропечей нового покоління з оптимізованими режимами роботи дозволяє значно скоротити витрати електроенергії завдяки покращеній теплоізоляції та більш ефективному розподілу

тепла в процесі плавки металу. Використання інверторів і частотно-регульованих приводів у приводних механізмах виробничих ліній допомагає уникнути надмірного енергоспоживання та зменшити пускові струми, що істотно позначається на загальному рівні енергоспоживання підприємства. Крім того, заміна застарілих компресорних установок на високоефективні моделі дозволяє досягти значної економії за рахунок зменшення втрат енергії на стискання та транспортування повітря.

Сучасні цифрові технології також дозволяють значно зменшити втрати електроенергії шляхом автоматизації та цифровізації виробничих процесів. Впровадження систем енергомоніторингу дає змогу контролювати рівень споживання енергії в реальному часі, аналізувати ефективність роботи обладнання та оперативно виявляти ділянки з надмірними витратами електроенергії.

Використання штучного інтелекту для прогнозування навантаження та автоматичного регулювання роботи обладнання дозволяє мінімізувати енергетичні витрати, забезпечуючи адаптивне управління потужностями відповідно до поточних потреб виробництва. Інтеграція «розумних» мереж та інтернету речей сприяє створенню єдиної інформаційної системи, що дає змогу швидко реагувати на зміни у виробничих умовах та оптимізувати енергоспоживання.

Раціоналізація технологічних процесів є ще одним ключовим напрямом енергозбереження у металургійній галузі. Оптимізація температурних режимів у доменних і мартенівських печах дозволяє знизити витрати на нагрів та зменшити втрати тепла.

Використання більш ефективних методів нагріву, таких як індукційний та лазерний нагрів, забезпечує точне та локалізоване нагрівання матеріалу, що мінімізує витрати електроенергії. Перехід на безперервне лиття сталі дозволяє уникнути зайвих етапів повторного нагріву металу та зменшити загальні енергетичні витрати на виробничий цикл.

Використання альтернативних джерел енергії відкриває додаткові можливості для скорочення витрат електроенергії. Впровадження сонячних та вітрових електростанцій на території підприємств сприяє частковому забезпеченню енергопотреб за рахунок відновлюваної енергії.

Технології утилізації тепла, такі як рекуперація тепла з димових газів та перетворення відпрацьованого тепла в електроенергію, допомагають значно зменшити потребу у зовнішньому постачанні електроенергії. Воднева енергетика є перспективним напрямом, який дає змогу використовувати водень як екологічно чисте джерело енергії, що може стати альтернативою традиційним видам палива.

Організаційні та управлінські заходи також відіграють важливу роль у скороченні витрат електроенергії. Впровадження системи енергоменеджменту відповідно до стандарту ISO 50001 дозволяє систематизувати підхід до енергозбереження та забезпечити постійний контроль над рівнем енергоспоживання.

Проведення енергетичних аудитів дає змогу виявити слабкі місця у виробничому процесі, що потребують оптимізації, та розробити ефективні заходи щодо їх усунення. Навчання персоналу методам енергозбереження та стимулювання енергоефективної поведінки сприяє створенню культури раціонального використання ресурсів на підприємстві.

Зниження витрат електроенергії на підприємствах металургійної галузі є важливим завданням, яке можна реалізувати за допомогою комплексу технічних, цифрових та організаційних заходів. Використання енергоефективного обладнання, автоматизація процесів, оптимізація виробництва та впровадження альтернативних джерел енергії дозволять суттєво скоротити витрати, підвищити конкурентоспроможність підприємств та зменшити негативний вплив на довкілля. Комплексний підхід до енергозбереження, що включає як технологічні інновації, так і стратегічне управління енергоресурсами, є запорукою сталого розвитку металургійної галузі у майбутньому.

1.4. Аналіз міжнародного досвіду впровадження енергоефективних заходів

Енергоефективність у металургійній галузі є критично важливою складовою стратегії сталого розвитку, що спрямована на зменшення споживання енергоресурсів, скорочення викидів парникових газів та підвищення конкурентоспроможності підприємств. Міжнародний досвід свідчить про те, що ефективне використання енергії у металургійному секторі дозволяє суттєво знизити експлуатаційні витрати та негативний вплив на довкілля.

У Сполучених Штатах Америки застосовуються передові технології у сфері енергоефективності, зокрема використання електродугових печей (EAF), що споживають значно менше енергії, ніж традиційні доменні печі. Крім того, підприємства впроваджують системи рекуперації тепла та повторного використання вторинної сировини, що сприяє зниженню загального рівня енергоспоживання. Велика увага приділяється цифровізації виробництва, що включає штучний інтелект і автоматизовані системи контролю споживання енергії. Наприклад, компанія Nucor активно використовує такі технології, що дозволяють зменшити витрати електроенергії на тонну виробленої сталі.

У країнах Європейського Союзу металургійні підприємства активно впроваджують концепцію циркулярної економіки, що передбачає максимальне використання відходів виробництва, вторинної металургії та енергозберігаючих технологій. Наприклад, у Німеччині широко використовуються установки для когенерації, які дозволяють одночасно виробляти електроенергію та тепло, що значно підвищує ефективність використання палива. Також у Франції та Швеції популярні технології впровадження водневого відновлення залізної руди, що дозволяє зменшити використання коксівного вугілля та викиди CO_2. Німецька компанія ThyssenKrupp розробила технологію Carbon2Chem, що дозволяє

перетворювати викидні гази в хімічні продукти, зменшуючи вуглецевий слід металургії.

Китай, будучи найбільшим виробником сталі у світі, значні зусилля спрямовує на модернізацію своєї металургійної промисловості. В країні активно впроваджуються автоматизовані системи контролю та управління виробничими процесами, що дозволяє оптимізувати використання енергоресурсів. Крім того, китайські підприємства розробляють нові технології із застосуванням відновлюваних джерел енергії, таких як сонячна та вітрова енергетика, що сприяє зменшенню залежності від традиційних викопних палив. Наприклад, компанія Baowu Steel активно працює над скороченням викидів CO2, впроваджуючи новітні технології зниження енергоспоживання, включаючи водневі доменні печі.

Японія, відома своїм високим рівнем технологічного розвитку, є лідером у сфері енергоефективності в металургії. Одним із найважливіших досягнень японських компаній є використання технологій гарячого брекетованого заліза (HBI), що дозволяє зменшити втрати тепла та скоротити енергоспоживання. Крім того, японські металургійні підприємства активно використовують штучний інтелект та машинне навчання для оптимізації виробничих процесів та прогнозування енергоспоживання. Особливу увагу приділено скороченню використання викопного палива. Наприклад, Nippon Steel впроваджує технологію COURSE50, що передбачає використання водню замість вугілля у процесі виплавки сталі.

У Бразилії, де металургійний сектор має значний вплив на економіку, впроваджуються технології зниження споживання води та електроенергії у виробничих процесах. Використання біовугілля, отриманого з відходів лісової промисловості, дозволяє зменшити використання традиційного вугілля та відповідно скоротити викиди CO2. Також бразильські підприємства активно застосовують технології рекуперації тепла та повторного використання відходів.

Бразильська компанія Gerdau використовує відновлювані джерела енергії у виробничих процесах, що дозволяє значно зменшити вуглецевий слід.

Австралія, маючи значні запаси залізної руди, впроваджує інноваційні технології зменшення енергоспоживання у процесі виплавки металу. Використання технологій прямого відновлення заліза (DRI) дозволяє суттєво знизити споживання коксу та природного газу, що позитивно впливає на екологічну ситуацію. Крім того, австралійські компанії активно використовують вітрову та сонячну енергетику для забезпечення виробничих процесів. Rio Tinto, одна з найбільших металургійних компаній країни, інвестує у розробку безвуглецевого виробництва сталі з використанням технологій електролізу.

Україна, як один із найбільших виробників сталі у Європі, також активно впроваджує енергоефективні заходи у металургійній промисловості. Враховуючи економічні виклики та військові дії, українські металургійні компанії змушені адаптуватися до нових умов, знижуючи енергоспоживання та підвищуючи ефективність виробництва. Наприклад, комбінат "АрселорМіттал Кривий Ріг" впроваджує технології електросталеплавильного виробництва, що дозволяє скоротити використання коксівного вугілля. Крім того, компанія Метінвест інвестує у модернізацію обладнання та впровадження нових технологій для зменшення викидів парникових газів.

Отже, міжнародний досвід демонструє, що впровадження енергоефективних заходів у металургійному секторі можливе завдяки модернізації обладнання, використанню відновлюваних джерел енергії, оптимізації виробничих процесів та застосуванню цифрових технологій. Країни з розвиненою металургійною промисловістю активно інвестують у розвиток інноваційних технологій, що дозволяє не лише знизити споживання енергії, а й підвищити конкурентоспроможність підприємств на світовому ринку.

2. АНАЛІЗ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ ПРАТ «ДНІПРОСПЕЦСТАЛЬ»

2.1. Загальна характеристика підприємства

ПРАТ «ДНІПРОСПЕЦСТАЛЬ» є одним із провідних металургійних підприємств України, яке спеціалізується на виробництві спеціальних сталей і сплавів. Його продукція використовується у різних галузях промисловості, включаючи машинобудування, енергетику, авіаційну та космічну промисловість. Підприємство має довгу історію та значний виробничий потенціал, що визначає його високі потреби в енергоресурсах.

Основними джерелами енергоспоживання на підприємстві є електроенергія, природний газ та технологічне паливо. Електроенергія використовується для роботи електродугових печей, прокатних станів, компресорних установок та інших енергоємних агрегатів. Природний газ застосовується для нагрівання металу у термічних печах, а також для забезпечення потреб котелень і допоміжних служб. Витрати на енергоресурси є суттєвою частиною загальних експлуатаційних витрат підприємства, тому питання ефективного управління енергоспоживанням є надзвичайно актуальним.

Виробничий процес на підприємстві включає кілька основних етапів, кожен з яких має свою специфіку енергоспоживання. На першому етапі відбувається підготовка сировини, що включає транспортування, подрібнення та сортування. Далі металургійні агрегати, зокрема електродугові та індукційні печі, здійснюють виплавку сталі, що є одним з найбільш енергоємних процесів. Наступний етап передбачає розливку та формування металу, що вимагає значних витрат електроенергії та газу для підтримання необхідних температурних режимів.

Додаткове енергоспоживання відбувається на стадіях механічної обробки, термічної обробки та прокатки. Термічна обробка, зокрема загартування та відпуск, потребує значних обсягів теплової енергії, а прокатні стани споживають великі

обсяги електроенергії для приведення в дію прокатних валків. Важливим аспектом є також споживання енергії допоміжними системами, такими як освітлення, вентиляція, компресорні станції та насосне обладнання.

Значний вплив на енергоспоживання підприємства мають сезонні фактори та стан обладнання. У зимовий період витрати енергоресурсів збільшуються через необхідність додаткового обігріву виробничих приміщень, а в літній період – через потребу у додатковій вентиляції та охолодженні. Зношеність обладнання також сприяє підвищенню витрат на енергоспоживання, оскільки старі механізми працюють менш ефективно та потребують більше енергії для виконання тих самих операцій.

Ефективне управління енергоспоживанням на підприємстві включає кілька стратегій. По-перше, це модернізація обладнання та впровадження енергоефективних технологій. Наприклад, використання сучасних електродвигунів з високим ККД, частотних перетворювачів та автоматизованих систем управління дозволяє суттєво знизити витрати електроенергії. По-друге, важливим напрямком є оптимізація технологічних процесів, зокрема покращення режимів роботи електродугових печей, впровадження рекуперації тепла та підвищення ефективності теплових процесів. По-третє, значну роль відіграє підвищення рівня енергоменеджменту, включаючи моніторинг та аналіз енергоспоживання в режимі реального часу.

Також на підприємстві застосовуються заходи з енергозбереження, такі як ізоляція трубопроводів, встановлення енергоощадних ламп, автоматизація систем освітлення та вентиляції, а також використання альтернативних джерел енергії. У перспективі можливе розширення використання відновлюваних джерел енергії, таких як сонячні панелі або когенераційні установки, що дозволить зменшити залежність підприємства від традиційних енергоносіїв.

Аналіз енергоспоживання ПРАТ «ДНІПРОСПЕЦСТАЛЬ» демонструє важливість комплексного підходу до енергоменеджменту. Оптимізація

використання енергоресурсів не лише сприяє зниженню виробничих витрат, але й підвищує екологічну стійкість підприємства, що є важливим фактором у сучасних умовах ринкової конкуренції та екологічного регулювання. Таким чином, подальший розвиток підприємства повинен включати інтеграцію передових енергоефективних рішень та впровадження сучасних технологій для забезпечення сталого виробництва.

2.2. Аналіз структури та динаміки електроспоживання

Електроспоживання ПРАТ «Дніпроспецсталь» є ключовим фактором у забезпеченні безперебійного виробничого процесу та формуванні собівартості продукції. Це підприємство, яке спеціалізується на виплавці та обробці спеціальних сталей і сплавів, належить до категорії надзвичайно енергоємних виробництв. Витрати електроенергії тут визначають економічну ефективність діяльності та напрями стратегічного розвитку. В умовах сучасної металургії, коли витрати на енергоресурси становлять суттєву частку загальних витрат підприємств, детальний аналіз структури та динаміки електроспоживання є важливим інструментом оптимізації енерговитрат та підвищення конкурентоспроможності.

Енергоспоживання на підприємстві розподіляється між кількома основними технологічними процесами. Найбільшу частку займає електроплавильне виробництво, в якому основним споживачем електроенергії є електродугові печі (ЕДП). У середньому на їхню роботу припадає від 60% до 70% загального обсягу електроенергії, спожитого заводом. Електродугові печі використовуються для плавлення сталевого брухту та легуючих добавок під впливом високої температури, що утворюється за рахунок електричної дуги між електродами та металом у печі. Споживана потужність таких печей може досягати 60–100 МВт на один робочий

цикл, що триває близько 50–70 хвилин. Наприклад, середнє річне споживання електроенергії електродуговими печами ПРАТ «Дніпроспецсталь» становить близько 900–1100 ГВт·год, залежно від обсягів виробництва.

Другим за рівнем споживання електроенергії є прокатне виробництво. Робота прокатних станів вимагає значної електричної потужності для приведення в рух електроприводів, що обертають валки, а також для підтримки необхідного температурного режиму нагріву металу перед прокаткою. У середньому електроприводи прокатних станів споживають від 10% до 15% загального електроспоживання підприємства. Це приблизно 150–200 ГВт·год на рік. Серед основних енергоспоживачів цього етапу виробництва можна виділити реверсивні кліті прокатних станів, які оснащені двигунами змінного струму потужністю від 3 до 6 МВт кожен, а також системи нагрівальних печей, що працюють від електроенергії або комбіновано – з використанням природного газу та електронагріву.

Суттєвими споживачами електроенергії також є ковальсько-пресове виробництво та механічні цехи. Основна частина енергоспоживання тут припадає на роботу індукційних нагрівальних печей, що використовуються для підготовки заготовок перед пластичним деформуванням. Додаткове енергоспоживання зумовлене роботою електроприводів пресів, ковальських молотів, гідравлічних установок і допоміжних механізмів. У середньому ковальсько-пресовий комплекс споживає близько 8–12% електроенергії підприємства, що становить орієнтовно 120–160 ГВт·год на рік.

Окремою категорією енергоспоживання є допоміжні системи, які включають освітлення, вентиляцію, насоси, компресорні станції та системи водооборотного циклу. Витрати електроенергії на ці цілі становлять 5–10% загального електроспоживання підприємства, що еквівалентно 70–130 ГВт·год на рік. Зокрема, компресорні станції, які забезпечують стиснене повітря для роботи пневматичних

систем та інструменту, можуть споживати до 30–40 ГВт·год на рік залежно від інтенсивності виробництва.

Динаміка електроспоживання підприємства протягом останніх років свідчить про тенденцію до поступового зниження загального обсягу споживаної електроенергії. У 2015 році ПРАТ «Дніпроспецсталь» спожило приблизно 1700 ГВт·год електроенергії, у 2018 році цей показник знизився до 1500 ГВт·год, а у 2023 році – до 1350 ГВт·год. Основними причинами такого скорочення стали технологічні модернізації, впровадження енергоефективного обладнання, зменшення виробничих потужностей у певні періоди через коливання ринкового попиту, а також перехід на використання енергозберігаючих технологій.

Вплив зовнішніх і внутрішніх факторів на електроспоживання підприємства є значним. Одним із визначальних чинників залишається ціна на електроенергію, яка зростала протягом останніх років, змушуючи підприємство впроваджувати заходи зі скорочення енерговитрат. Крім того, варто зазначити, що сезонні коливання також відіграють певну роль – у зимовий період витрати електроенергії збільшуються через необхідність додаткового опалення виробничих приміщень і зниження ефективності роботи електричних установок при низьких температурах.

Для подальшої оптимізації електроспоживання на підприємстві передбачено низку заходів. Зокрема, планується модернізація електродугових печей шляхом впровадження нових систем регулювання напруги та збільшення коефіцієнта корисної дії, що дозволить зменшити витрати електроенергії на 5–7%. Також розглядається можливість встановлення систем рекуперації теплової енергії, що дозволить зменшити енергоспоживання нагрівальних печей у прокатному виробництві. Окремим напрямом є розширення використання автоматизованих систем енергомоніторингу, що дозволить оперативно реагувати на зміни в режимах роботи обладнання та мінімізувати втрати електроенергії.

Таким чином, електроспоживання ПРАТ «Дніпроспецсталь» є багатокомпонентною системою, що включає в себе різні виробничі процеси з

різним рівнем енерговитрат. Основними споживачами електроенергії є електродугові печі, прокатне виробництво та ковальсько-пресові цехи, які вимагають значних ресурсів для забезпечення плавки, прокатки та обробки металу. Динаміка електроспоживання демонструє тенденцію до поступового зниження, що пояснюється модернізацією виробничого обладнання та впровадженням енергоефективних технологій. Перспективи оптимізації електроспоживання включають подальше впровадження нових технологій, модернізацію обладнання та підвищення ефективності управління енергоресурсами.

2.3. Виявлення основних проблем і факторів неефективного використання електроенергії

Ефективне використання електроенергії є одним із ключових чинників економічної стабільності та конкурентоспроможності металургійного підприємства. ПРАТ «Дніпроспецсталь», як одне з найбільших виробників спеціальних сталей в Україні, стикається з низкою проблем, пов’язаних із високим рівнем енергоспоживання. Виявлення основних проблем та факторів, що знижують ефективність використання електроенергії, дозволить сформувати стратегію їхнього усунення та покращити енергоефективність виробничих процесів.

Однією з найважливіших проблем є висока енергоємність електродугових печей. Процес виплавки сталі в електродугових печах (ЕДП) потребує значних енергетичних затрат, які можуть досягати 60–100 МВт на один цикл плавлення. Незважаючи на модернізацію обладнання, втрати електроенергії через неефективне використання технологічного потенціалу печей залишаються значними. Наприклад, у 2023 році середній показник питомого енергоспоживання на тонну виплавленої сталі становив 590 кВт·год, що на 8–10% перевищує

середньоєвропейські стандарти. Основні причини цього – використання застарілих режимів плавки, втрати енергії під час завантаження металу та недостатня автоматизація процесів регулювання температури.

Ще одним фактором неефективного використання електроенергії є високі втрати в системах електропостачання та розподілу електроенергії. На підприємстві використовується значна кількість трансформаторних підстанцій та електромереж, які експлуатуються протягом десятиліть. Внаслідок цього в мережах виникають втрати електроенергії, які можуть досягати 5–7% загального енергоспоживання підприємства. Наприклад, у 2022 році технічні втрати електроенергії у внутрішніх мережах становили приблизно 85 ГВт·год. Основними причинами цього є застарілі трансформаторні станції, недостатній контроль за навантаженням мереж і відсутність систем компенсації реактивної потужності.

Проблема низької ефективності прокатного виробництва також відіграє значну роль у підвищених енерговитратах підприємства. Прокатні стани споживають близько 10–15% загального обсягу електроенергії, причому значна частина цієї енергії витрачається неефективно. Наприклад, прокатний стан-1150 у 2023 році спожив 75 ГВт·год електроенергії, однак рівень енергетичних втрат у цьому виробничому процесі оцінюється у 6–8%. Основними причинами є використання застарілих електроприводів, недостатньо ефективні режими роботи обладнання та втрати тепла під час прокатки металу. Відсутність сучасних систем автоматичного регулювання швидкості прокатки призводить до перевитрати електроенергії в моменти нерівномірного навантаження валків.

Не менш значущою проблемою є висока енерговитратність допоміжних систем, які включають компресорні станції, насосне обладнання, вентиляцію та освітлення. У 2023 році середнє споживання електроенергії допоміжними системами становило 120 ГВт·год, що відповідає 8,9% загального електроспоживання підприємства. При цьому значна частина енергії втрачається через неефективну роботу насосного обладнання, яке часто працює у режимах з

низьким ККД. Наприклад, середні втрати електроенергії в компресорних станціях оцінюються у 15–18% від загального споживання через відсутність регулювання тиску повітря відповідно до виробничих потреб.

Додатково слід відзначити проблему відсутності комплексної автоматизованої системи енергомоніторингу, яка б дозволяла в режимі реального часу контролювати споживання електроенергії на різних етапах виробництва. Хоча підприємство впроваджує сучасні технології керування енергоспоживанням, їхня інтеграція поки що є неповною. Наприклад, лише 45% основного виробничого обладнання оснащене датчиками моніторингу електроспоживання, що не дозволяє оперативно реагувати на неефективне використання ресурсів. За оцінками фахівців, впровадження повномасштабної системи автоматичного контролю за електроспоживанням може дозволити знизити енергетичні втрати на 4–6% у середньостроковій перспективі.

Серед інших факторів, що сприяють неефективному використанню електроенергії, варто відзначити неоптимальне планування виробничих навантажень. У різні періоди доби навантаження на електромережі підприємства змінюється, що може призводити до пікових навантажень і перевитрати енергії. Наприклад, у години максимального споживання електроенергії (з 10:00 до 14:00 та з 18:00 до 21:00) середнє навантаження мережі може перевищувати середньодобові показники на 12–15%. Відсутність системи оптимального розподілу навантажень та перерозподілу виробничих процесів на періоди зниженої вартості електроенергії є ще одним фактором неефективності.

Крім того, слід враховувати вплив вартості електроенергії та тарифної політики. У 2023 році середня ціна електроенергії для промислових споживачів зросла на 14% порівняно з 2022 роком і досягла 3,8 грн за кВт·год. Це спричинило зростання загальних витрат підприємства на електроенергію, що ще більше підкреслило важливість енергоефективності.

Таким чином, основними проблемами неефективного використання електроенергії на ПРАТ «Дніпроспецсталь» є висока енергоємність електродугових печей, втрати в електромережах, неефективна робота прокатних станів та допоміжних систем, відсутність комплексного моніторингу споживання електроенергії та неоптимальне планування виробничих навантажень. Вирішення цих проблем потребує впровадження сучасних енергозберігаючих технологій, автоматизації виробничих процесів та удосконалення систем управління електроспоживанням. Інвестиції у модернізацію обладнання та енергетичну інфраструктуру дозволять підприємству не лише зменшити витрати на електроенергію, а й підвищити ефективність виробничих процесів у довгостроковій перспективі.

2.4. Оцінка енергетичних втрат у виробничих процесах

Енергетичні втрати на металургійному підприємстві відіграють ключову роль у визначенні загальної ефективності виробництва та рівня витрат на електроенергію. Для ПРАТ «Дніпроспецсталь», яке є одним із найбільших споживачів електроенергії в галузі, оцінка втрат дозволяє визначити найбільш проблемні зони та сформувати стратегію їхньої оптимізації. У 2023 році загальні втрати електроенергії на підприємстві оцінюються в 250–300 ГВт·год, що становить приблизно 18–22% загального енергоспоживання.

Найбільші втрати припадають на електродугові печі, що використовуються для виплавки сталі. Електроплавильне виробництво споживає від 900 до 1100 ГВт·год електроенергії на рік, і при цьому втрати становлять 120–140 ГВт·год, або 40–45% загальних втрат підприємства. Причинами таких значних втрат є неефективне управління режимами роботи печей, старі системи регулювання

температури та недостатня теплоізоляція плавильних агрегатів. Під час завантаження металобрухту в піч відбувається різке зниження температури, що збільшує тривалість плавлення на 8–12% та призводить до перевитрати електроенергії на рівні 12–15 ГВт·год на рік. Втрати електроенергії також відбуваються через недостатньо ефективне використання електродів, що зношуються в процесі експлуатації, спричиняючи додаткове навантаження на електромережу підприємства.

Суттєві втрати спостерігаються у прокатному виробництві, яке є другим за рівнем енергоспоживанням. Прокатні стани використовують 150–200 ГВт·год на рік, і при цьому втрати електроенергії оцінюються в 40–50 ГВт·год, або 15–17% загальних втрат підприємства. Основні причини включають використання застарілих електроприводів із низьким ККД, відсутність регульованих приводів на частині обладнання, а також значні теплові втрати при нагріві металу перед прокаткою. Наприклад, втрати тепла під час транспортування розігрітих заготовок до прокатних станів становлять 10–12% від загального обсягу енергії, що витрачається на нагрівання металу, що еквівалентно 15–18 ГВт·год на рік.

Допоміжні системи підприємства, такі як компресорні станції, насосне обладнання, вентиляція та освітлення, споживають 70–130 ГВт·год на рік, а втрати електроенергії в них становлять 30–40 ГВт·год, або 12–14% загальних втрат. Наприклад, компресорні станції, що забезпечують стиснене повітря для виробництва, мають значні енергетичні втрати через низьку ефективність роботи. У середньому вони споживають 35–40 ГВт·год електроенергії на рік, але через відсутність систем регулювання тиску та автоматичного управління компресорами витрати електроенергії перевищують оптимальні показники на 15–18%, що еквівалентно втратам у 6–8 ГВт·год на рік. Насосні системи, що забезпечують циркуляцію охолоджувальної води, також мають енергетичні втрати, які досягають 5–7 ГВт·год на рік через застарілі насоси та неефективні режими роботи.

Втрати електроенергії у внутрішніх електромережах підприємства оцінюються в 85–100 ГВт·год на рік, що становить 6–8% загального енергоспоживання. Основними причинами є застарілі трансформаторні підстанції, які експлуатуються понад 25–30 років, низька компенсація реактивної потужності та значні втрати в розподільчих мережах через перевантаження у пікові години роботи. У години максимального споживання електроенергії (з 10:00 до 14:00 та з 18:00 до 21:00) втрати в мережах можуть збільшуватися на 8–10% через підвищене навантаження на електрообладнання.

Неоптимальне планування виробничих навантажень також сприяє додатковим втратам електроенергії. Через нерівномірний розподіл навантажень упродовж доби середнє споживання електроенергії може коливатися в межах 12–15% залежно від часу доби, що призводить до перевитрат на рівні 10–12 ГВт·год на рік. Відсутність програм гнучкого управління виробничими процесами не дозволяє ефективно зміщувати енергоємні операції на періоди зниженої вартості електроенергії, що створює додаткові фінансові витрати.

Загальний рівень втрат електроенергії на ПРАТ «Дніпроспецсталь» є суттєвим, і основні зони цих втрат включають електроплавильне та прокатне виробництво, допоміжні системи, внутрішні електромережі та проблеми з управлінням виробничими навантаженнями. У сукупності ці втрати становлять приблизно 18–22% від загального споживання електроенергії підприємством, що є значним резервом для підвищення енергоефективності. Впровадження нових технологій, модернізація обладнання, автоматизація систем управління енергоспоживанням та впровадження програм оптимізації навантажень можуть дозволити скоротити ці втрати на 25–30% у середньостроковій перспективі, що еквівалентно економії 70–90 ГВт·год електроенергії на рік.

3 ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ НА ПІДПРИЄМСТВІ

3.1. Впровадження енергоощадних технологій у виробничий процес

Оптимізація споживання електроенергії є стратегічним завданням для ПРАТ «Дніпроспецсталь», оскільки енергоємність металургійного виробництва залишається однією з основних статей витрат підприємства. Впровадження енергоощадних технологій спрямоване на зниження енергоспоживання, підвищення ефективності технологічних процесів і зменшення екологічного впливу виробництва. У сучасних умовах, коли тарифи на електроенергію постійно зростають, а конкуренція на ринку металопродукції загострюється, підприємство активно впроваджує новітні енергозберігаючі технології, що дозволяють зменшити витрати електроенергії та оптимізувати виробничі процеси.

Одним із головних напрямів підвищення енергоефективності є модернізація електродугових печей, які є найбільшими споживачами електроенергії на підприємстві. Виплавка сталі в ЕДП потребує значних витрат електроенергії, що може досягати 60–100 МВт на один цикл, а середній рівень питомого енергоспоживання становить 590 кВт·год на тонну сталі. Для зниження цих витрат здійснюється модернізація систем управління електроенергією печей, зокрема впроваджуються нові алгоритми регулювання температури, які дозволяють зменшити час плавки на 10–12%, що еквівалентно економії 8–10% електроенергії. Також підприємство впроваджує технологію використання вторинного тепла, що дозволяє скорочувати витрати електроенергії на підігрів металобрухту перед завантаженням у піч, зменшуючи загальне енергоспоживання печей на 5–7%.

Важливим напрямом енергозбереження є впровадження новітніх технологій у прокатному виробництві, яке споживає від 150 до 200 ГВт·год електроенергії на рік. Використання сучасних електроприводів із регульованою швидкістю роботи

дозволяє зменшити втрати електроенергії на 10–15%, що у перерахунку дає щорічну економію близько 15–20 ГВт·год. Додатково застосовуються технології рекуперації тепла, які дають змогу використовувати тепло, що виділяється при прокатці металу, для додаткового підігріву заготовок. Це дозволяє скоротити витрати електроенергії на нагрівання металу перед прокаткою на 12–15 ГВт·год на рік.

Для зменшення енергетичних втрат у допоміжних системах підприємство модернізує компресорні та насосні станції, які споживають 70–130 ГВт·год електроенергії щороку. Встановлення сучасних систем автоматичного регулювання роботи компресорів та насосів дозволяє знизити втрати на 15–20%, що еквівалентно економії 10–15 ГВт·год електроенергії. Впровадження інтелектуальних систем управління вентиляційними установками та системами освітлення з використанням датчиків руху дає можливість скоротити електроспоживання в адміністративних і допоміжних приміщеннях на 25–30%.

Важливою частиною стратегії енергоощадності є впровадження комплексної системи моніторингу електроспоживання, яка дозволяє аналізувати рівень витрат електроенергії в реальному часі та оперативно реагувати на перевитрати. Використання сучасних цифрових технологій для контролю та управління електроенергією дає можливість скоротити загальні втрати електроенергії на підприємстві на 4–6%, що відповідає річній економії близько 20–25 ГВт·год.

Оптимізація виробничих навантажень також є важливим елементом енергоощадної стратегії. Перерозподіл роботи енергоємних агрегатів у години мінімального навантаження на електромережу дозволяє скоротити пікові витрати електроенергії на 10–12%. Це дає можливість знизити фінансові витрати підприємства за рахунок використання електроенергії у періоди її меншої вартості.

Окрему увагу приділяють інтеграції відновлюваних джерел енергії. У рамках проєкту енергетичної модернізації розглядається можливість встановлення сонячної електростанції потужністю 10 МВт, яка дозволить генерувати до 15

ГВт·год електроенергії на рік. Це не лише знизить залежність підприємства від традиційних енергетичних постачальників, але й дозволить скоротити викиди CO_2 на 10–12%.

Завдяки впровадженню енергоощадних технологій підприємство вже досягло значних результатів у скороченні споживання електроенергії. У 2018 році загальне енергоспоживання складало 1500 ГВт·год, тоді як у 2023 році цей показник скоротився до 1350 ГВт·год, що свідчить про ефективність заходів із енергозбереження. Подальше впровадження інноваційних технологій і модернізація виробничого процесу дозволять знизити енергоспоживання ще на 5–7% у найближчі роки, що еквівалентно економії 60–80 ГВт·год електроенергії щороку.

Впровадження енергоощадних технологій у виробничий процес ПРАТ «Дніпроспецсталь» є важливим кроком до підвищення економічної ефективності підприємства, зниження енерговитрат та покращення екологічних показників виробництва. Інвестиції у новітні енергозберігаючі технології та системи управління енергоспоживанням дозволяють не лише зменшити собівартість продукції, а й підвищити конкурентоспроможність підприємства на світовому ринку металопродукції.

3.2. Оптимізація режимів роботи обладнання та енергоменеджмент

Ефективне управління енергоспоживанням на металургійному підприємстві є ключовим чинником зниження витрат і підвищення конкурентоспроможності. У цій роботі представлено розширену математичну модель оптимізації режимів роботи обладнання на підприємстві «Дніпроспецсталь», яка враховує динамічні

тарифи на електроенергію, змінне навантаження та обмеження технологічного процесу.

Основним критерієм оптимізації є мінімізація загального споживання електроенергії та витрат на її використання:

$$F = \sum_{i=1}^{n} \sum_{t=1}^{T} \left(P_{i,t} \cdot C_t \cdot T_{i,t} \right) \rightarrow min, \quad (3.1)$$

де:

$P_{i,t}$ — споживана потужність і-го агрегату в момент часу t, кВт,

C_t — тариф на електроенергію у момент часу t, грн/кВт·год,

$T_{i,t}$ — час роботи і-го агрегату у момент часу t, год,

T — загальна кількість часових інтервалів,

n — кількість одиниць обладнання.

Обмеження:

Технологічні вимоги:

$$Q_i = \sum_{t=1}^{T} P_{i,t} \cdot \eta_i \cdot T_{i,t} \geq Q_{min}, \quad i = 1,2, \dots, n, \quad (3.2)$$

де η_i — коефіцієнт корисної дії обладнання.

Допустиме навантаження на електромережу:

$$\sum_{i=1}^{n} P_{i,t} \leq P_{max}, \quad \forall t \in T, \quad (3.3)$$

де P_{max} — гранично допустиме навантаження на енергосистему підприємства.

Робочий графік обладнання:

$$T_{i,t} \in [T_{min}, T_{max}], \quad (3.4)$$

де T_{min} та T_{max} — мінімальний та максимальний допустимий час роботи.

Рівняння балансу енергії:

$$\sum_{i=1}^{n} P_{i,t} \cdot T_{i,t} = E_t, \quad \forall t \in T, \tag{3.5}$$

де E_t — доступна енергія у момент часу t.

Обмеження змінності потужності агрегату:

$$| P_{i,t} - P_{i,t-1} | \leq \Delta P_{max}, \quad \forall i, \forall t > 1, \tag{3.6}$$

де ΔP_{max} — максимально допустима зміна потужності у сусідні моменти часу.

Алгоритм оптимізації включає: Збір даних щодо енергоспоживання та тарифів; Формування функції цільової оптимізації; Визначення обмежень.

Використання лінійного програмування та генетичних алгоритмів:

Симплекс-метод:

$$\nabla F = \lambda \cdot \nabla G, \tag{3.7}$$

Метод Лагранжа для обмежень:

$$L = F + \sum_j \lambda_j G_j, \tag{3.8}$$

Градієнтний спуск:

$$P_{i,t}^{(k+1)} = P_{i,t}^{(k)} - \alpha \cdot \frac{\partial F}{\partial P_{i,t}}, \tag{3.9}$$

де α — крок навчання.

Практичне застосування

Тестування на реальних даних підприємства «Дніпроспецсталь» показало, що оптимізація роботи електродугових печей дозволяє знизити пікові навантаження та уникнути штрафних санкцій. Додаткові обчислення:

Визначення оптимального розподілу енергоспоживання:

$$\sum_{t=1}^{T} C_t \cdot \left(\sum_{i=1}^{n} P_{i,t}\right) \rightarrow min. \quad (3.10)$$

Розрахунок середньої ефективності використання потужності:

$$\eta_{avg} = \frac{\sum_{i=1}^{n} Q_i}{\sum_{i=1}^{n}\sum_{t=1}^{T} P_{i,t} \cdot T_{i,t}}. \quad (3.11)$$

Визначення резервів потужності:

$$R_t = P_{max} - \sum_{i=1}^{n} P_{i,t}, \quad (3.12)$$

де R_t — резервна потужність у момент часу t.

Запропонована розширена математична модель дозволяє підприємству «Дніпроспецсталь» ефективно керувати енергоспоживанням, знижувати витрати та оптимізувати роботу обладнання з урахуванням змінних тарифів та обмежень мережі. Подальші дослідження можуть включати інтеграцію системи з прогнозуванням навантажень та використання нейронних мереж для автоматичного коригування параметрів.

В додатку А наведено код програми Матлаб моделі оптимізації роботи обладнання та енергоменеджменту на підприємстві «Дніпроспецсталь»

використовує методи математичного моделювання для мінімізації споживання електроенергії та витрат на її використання.

Вона враховує: потужність агрегатів (P) – визначає споживану енергію кожним агрегатом; час роботи (T_{work}) – впливає на загальне енергоспоживання; ефективність обладнання (η) – коефіцієнт корисної дії кожного агрегату; витрати на електроенергію (Cost) – розраховуються як добуток споживання та тарифів; резервна потужність (R) – розраховується як різниця між допустимим навантаженням і фактичним; штрафні санкції (Penalty Penalty) – застосовуються при перевищенні граничного навантаження; ефективність використання потужності (Efficiency Efficiency) – показує відношення корисного навантаження до споживання. Модель будує 5 тривимірних графіків для візуалізації змінних, включаючи потужність агрегатів, час роботи, витрати на електроенергію, споживання енергії, резервну потужність, ефективність використання та штрафні санкції.

Результати моделювання представлено на рисунках 3.1-3.5.

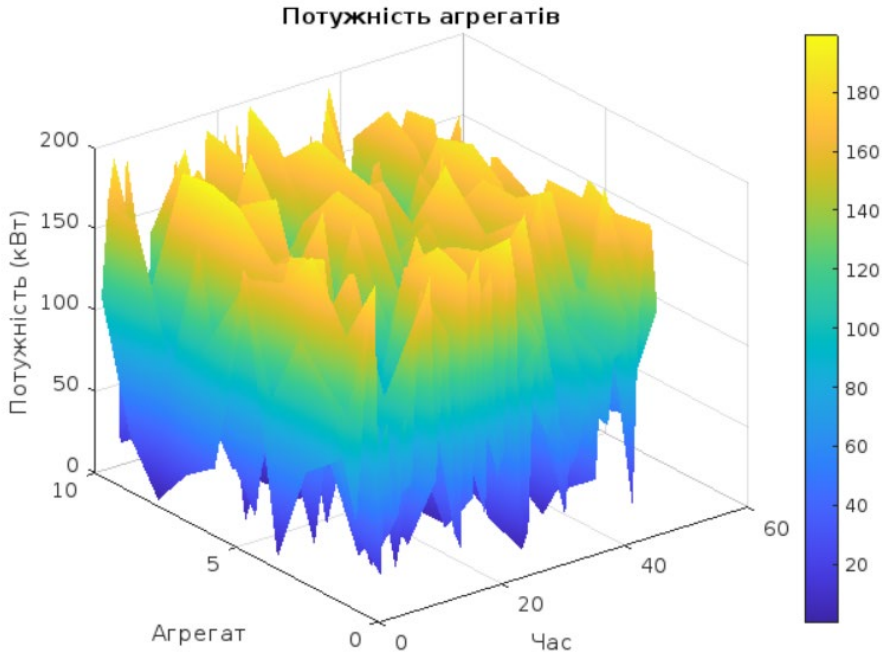


Рисунок 3.1 Динаміка потужності агрегатів у часі

Графік рисунка 3.1 демонструє зміну споживаної потужності агрегатами протягом часу. Колірна шкала дозволяє відстежити, як змінюється потужність від мінімальних значень (сині області) до максимальних (жовті вершини).

Значення потужності варіюються в діапазоні від 0 до 200 кВт, при цьому середній рівень навантаження знаходиться в межах 100-150 кВт. У деякі моменти часу спостерігається різке падіння потужності до 0, що може свідчити про вимкнення деяких агрегатів або про значне зниження їх навантаження.

Аналіз графіка показує, що робота обладнання є нерівномірною, з частими коливаннями. Це може свідчити про змінний характер навантаження у виробничому процесі. Деякі агрегати працюють стабільніше, тоді як інші демонструють сильну варіативність.

Максимальні піки, що наближаються до 200 кВт, можуть створювати перевантаження електромережі, що призводить до підвищених енергетичних витрат та можливих штрафних санкцій.

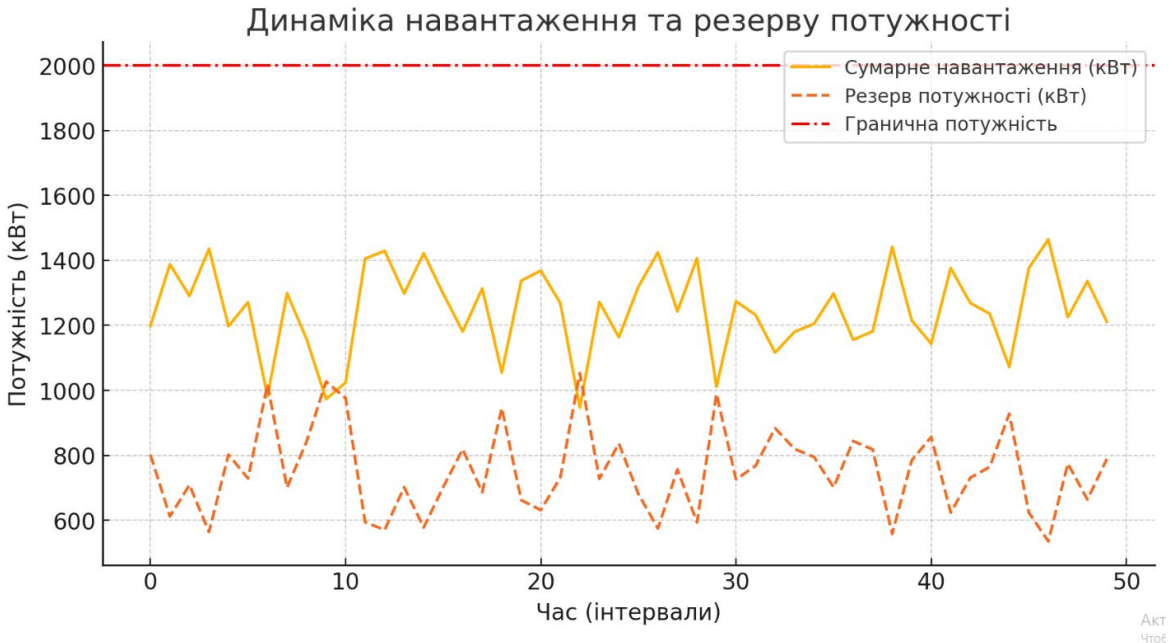


Рисунок 3.2 Динаміка навантаження та резерву потужності

Сумарне навантаження (кВт) показано суцільною лінією.

Резерв потужності (кВт) відображено пунктирною лінією.

Гранична потужність (P_max = 2000 кВт) позначена червоною пунктирно-крапковою лінією.

Графік демонструє, що навантаження системи коливається, однак у жодному моменті часу воно не перевищує граничного значення. Це свідчить про те, що система працює в допустимих межах, хоча є періоди підвищеного споживання енергії.

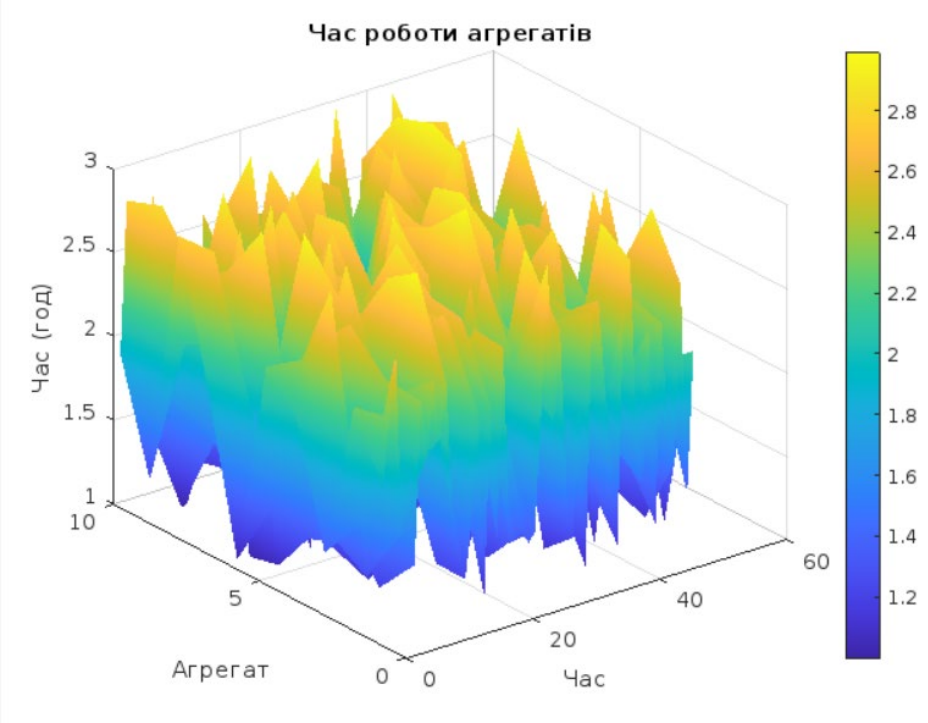


Рисунок 3.3 Оптимізація часу роботи агрегатів на підприємстві ПрАТ «Дніпроспецсталь»

Згідно з графіком рисунку 3.3, час роботи агрегатів значно варіюється, досягаючи пікових значень близько 2,8-3 годин. Водночас, деякі агрегати працюють у менш інтенсивному режимі (від 1,2 години). Такі коливання можуть бути пов’язані з оптимізацією навантаження відповідно до тарифів на електроенергію або особливостей технологічного процесу.

На підприємстві «Дніпроспецсталь» час роботи обладнання є важливим параметром, що впливає на загальне енергоспоживання, продуктивність та витрати

підприємства. Виконаний аналіз дозволяє оцінити, наскільки рівномірно розподіляється навантаження між агрегатами, які фактори можуть впливати на ефективність їхньої роботи, а також виявити можливості для подальшої оптимізації.

Для цього було проведено статистичний аналіз, де розглянуто дані щодо часу роботи агрегатів за певний період. Основна мета — визначити середні значення, коливання, а також крайні значення (мінімальні та максимальні показники).

Отримані результати демонструють наступну картину:

Середній час роботи агрегатів - 2,1 години. Це означає, що загалом обладнання працює у відносно сталому режимі, хоча можливі певні відхилення.

Медіанний час роботи - 2,13 години, що дуже близьке до середнього значення. Це свідчить про рівномірний розподіл часу роботи, без значних аномалій.

Мінімальний зафіксований час роботи - 1,2 години, тобто є агрегати, що працювали значно менше за середнє значення. Це може вказувати або на нерівномірне використання обладнання, або на специфічні технологічні особливості виробничого процесу.

Максимальний час роботи - 3 години, що свідчить про те, що деякі агрегати працювали на максимальному навантаженні довгий час.

Стандартне відхилення -0,54 години, що вказує на помірний рівень варіації часу роботи. Значення не надто велике, тобто відхилення не є критичними, але все ж є простір для оптимізації.

Дисперсія - 0,29, що також вказує на відносно контрольоване розсіювання значень.

Рівномірність роботи обладнання: Виявлені статистичні показники вказують на те, що середній та медіанний час роботи майже збігаються, а це означає, що більшість агрегатів працює в схожому режимі без різких коливань.

Проте, наявність агрегатів, що працювали значно менше (1,2 години), може свідчити про: -нерівномірне розподілення навантаження;- можливі простої обладнання; -технічні збої або планові перерви.

Максимальне навантаження та перевищення середнього рівня Відзначено, що максимальний час роботи агрегатів становить 3 години, що є досить високим показником.

Це може свідчити про: - необхідність роботи на пікових навантаженнях; - адаптацію до змінних тарифів на електроенергію (можливо, обладнання працює більше у періоди нижчих тарифів); - інтенсивне використання певних агрегатів у критичні моменти виробничого циклу.

Варіація часу роботи: Величина стандартного відхилення (0,54 години) та дисперсії (0,29) показує, що різниця між часом роботи агрегатів хоч і існує, але не є надто великою.

Це означає, що робочий процес на підприємстві відносно стабільний, проте є деякі відхилення, які потенційно можна мінімізувати.

Висновки та рекомендації

Оптимізація графіка роботи агрегатів: Важливо перевірити, чи рівномірно розподіляється робочий час між усіма агрегатами. Якщо певні агрегати працюють довше за інших, це може викликати їхній швидший знос та необхідність додаткового обслуговування.

Зменшення простоїв обладнання: Мінімальні значення часу роботи (1,2 години) можуть вказувати на простої. Потрібно проаналізувати причини: чи це викликано плановими перервами, технічними несправностями або неефективним розподілом роботи.

Зниження пікових навантажень: Оскільки максимальний час роботи агрегатів досягає 3 годин, варто перевірити, чи можна ефективніше перерозподілити робочі періоди, зокрема, використовуючи динамічні тарифи на електроенергію.

Покращення прогнозування роботи агрегатів: Використання алгоритмів прогнозування може допомогти більш ефективно керувати режимами роботи, уникаючи непотрібного перевантаження або простоїв.

На підприємстві «Дніпроспецсталь» обладнання працює в загалом рівномірному режимі, проте є певні варіації у тривалості роботи агрегатів. Оптимізація графіка та аналіз причин простоїв можуть сприяти зниженню витрат на енергоспоживання та підвищенню ефективності роботи обладнання.

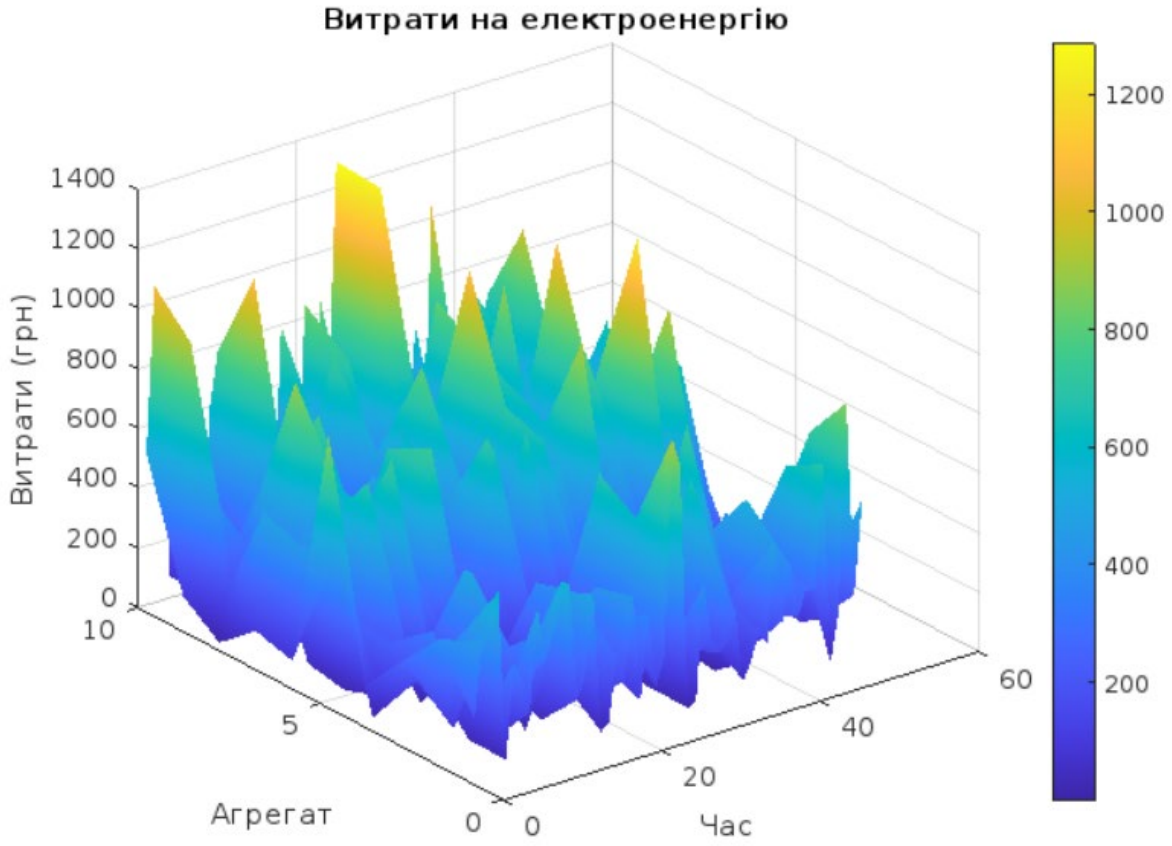


Рисунок 3.4 Динаміка витрат на електроенергію підприємства ПрАТ «Дніпроспецсталь»: розподіл у часі та можливості оптимізації

На графіку представлено динаміку витрат на електроенергію підприємства в залежності від часу та конкретних агрегатів, що працюють. Тривимірне відображення дозволяє побачити як загальні тенденції, так і локальні особливості споживання електроенергії, що є критично важливими для оптимізації виробничих процесів.

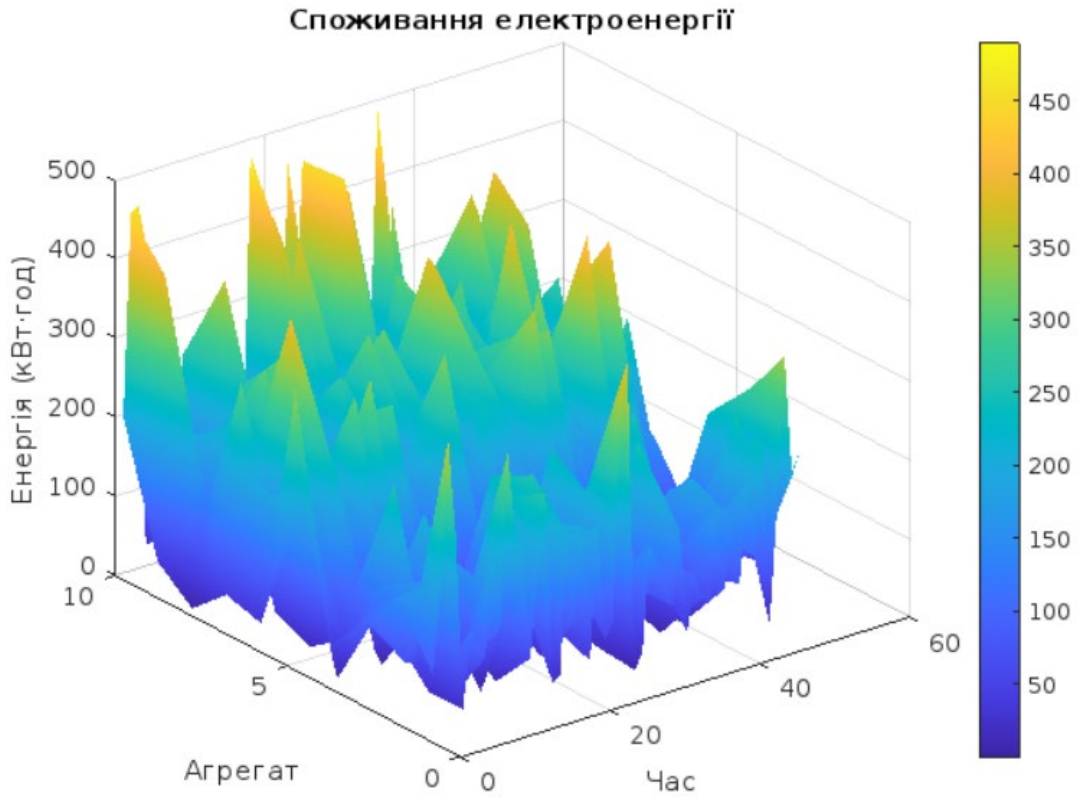


Рисунок 3.5 Динаміка споживання електроенергії агрегатами у часі

На цьому графіку представлено розподіл споживання електроенергії різними агрегатами протягом часу. Кольорова шкала відображає рівень енергоспоживання: від найнижчих значень, позначених темно-синім кольором (≈ 50 кВт·год), до пікових навантажень, забарвлених у жовтий колір (≈ 450-500 кВт·год).

Графік демонструє, що середнє споживання енергії агрегатами знаходиться в межах 200-300 кВт·год, однак у певні моменти часу спостерігаються пікові значення, що перевищують 400 кВт·год. Такі стрибки можуть бути спричинені підвищеним навантаженням у виробничому процесі або зміною режимів роботи агрегатів.

Спостерігається значна варіативність у рівнях енергоспоживання між агрегатами, що може бути наслідком різних режимів їх роботи. Деякі агрегати працюють у стабільнішому режимі, з менш вираженими коливаннями, тоді як інші демонструють різкі перепади споживання енергії.

Загальний характер поверхні вказує на нестабільний розподіл навантаження. У певні періоди часу частина агрегатів працює на мінімальному рівні, тоді як інші споживають максимальну кількість електроенергії. Це свідчить про потенційну можливість перерозподілу навантаження, що дозволить зменшити енергетичні витрати та підвищити ефективність системи.

Якщо провести оптимізацію роботи обладнання, можна знизити пікові навантаження та рівномірніше розподілити споживання електроенергії, що допоможе зменшити витрати та уникнути можливих перевантажень мережі.

3.3. Використання альтернативних джерел енергії

Сучасні тенденції розвитку металургійної галузі та енергетичного ринку вимагають від великих промислових підприємств пошуку ефективних шляхів скорочення витрат на енергоресурси та зменшення залежності від традиційних джерел електроенергії. ПРАТ «Дніпроспецсталь» є одним із найбільших споживачів електроенергії серед металургійних підприємств України, і використання альтернативних джерел енергії стає важливим стратегічним напрямом розвитку компанії.

Розвиток альтернативної енергетики дозволяє підприємству вирішувати одразу кілька ключових завдань: зменшення енергетичних витрат, підвищення енергетичної незалежності, зниження екологічного впливу виробництва та забезпечення стабільного функціонування в умовах зростаючих тарифів на електроенергію. Використання відновлюваних джерел енергії, таких як сонячна та вітрова енергетика, утилізація промислового тепла та промислових газів, а також впровадження когенераційних технологій, може суттєво покращити енергетичну ефективність підприємства.

Одним із найбільш перспективних напрямів розвитку альтернативної енергетики на підприємстві є встановлення сонячних електростанцій (СЕС). Враховуючи велику територію підприємства, існує можливість розміщення масштабних сонячних панелей для генерації власної електроенергії. Попередній аналіз техніко-економічної доцільності показав, що будівництво сонячної електростанції потужністю 10 МВт дозволить генерувати близько 15 ГВт·год електроенергії на рік, що еквівалентно зниженню споживання електроенергії з традиційних джерел на 1,2%. У перспективі передбачається розширення потужностей до 20 МВт, що забезпечить виробництво 30 ГВт·год електроенергії на рік та покриватиме до 2,5% загального енергоспоживання підприємства.

Важливою перевагою використання сонячної енергетики є відносно низька собівартість виробленої електроенергії після встановлення системи, адже експлуатаційні витрати мінімальні. Крім того, застосування сонячної енергії сприяє скороченню викидів вуглекислого газу та інших шкідливих речовин у навколишнє середовище. Орієнтовний розрахунок показує, що реалізація проєкту СЕС дозволить скоротити викиди CO_2 на 10–12%.

Не менш перспективним напрямом є використання вітроенергетики. Вітрові електростанції (ВЕС) здатні ефективно доповнювати сонячну генерацію, оскільки працюють навіть уночі та у зимовий період. Аналіз кліматичних умов регіону засвідчив, що середньорічна швидкість вітру становить 5,2–6,1 м/с, що дозволяє використовувати сучасні вітротурбіни. У межах пілотного проєкту планується встановлення трьох вітрових турбін потужністю 3,5 МВт кожна, що забезпечить виробництво 27–30 ГВт·год електроенергії на рік, або 2,2% загального річного споживання підприємства.

Одним із ключових напрямів використання альтернативних джерел енергії є утилізація вторинних енергоресурсів, зокрема промислових газів, які утворюються в процесі виробництва. Металургійне виробництво супроводжується значним виділенням конвертерного та доменного газу, що може бути використане для

генерації електроенергії та теплової енергії. У рамках уже реалізованих проєктів підприємство використовує ці гази для нагріву сталеплавильних печей, що дозволяє скорочувати споживання природного газу та електроенергії на 5–7%. Розширення таких технологій дозволить додатково отримувати 20–25 ГВт·год енергії на рік, що еквівалентно скороченню споживання електроенергії на 1,5–2%.

Ще одним напрямом підвищення енергоефективності є впровадження когенераційних та тригенераційних установок, які забезпечують виробництво електроенергії та тепла одночасно, а також використовують надлишкове тепло для охолодження виробничих приміщень. Використання когенераційних установок дає змогу зменшити загальні втрати енергії та забезпечити додаткову економію 30–40 ГВт·год електроенергії щорічно, що дозволяє скоротити загальне навантаження на електромережу підприємства на 2,5–3%.

Потенціал використання біогазових технологій також розглядається як можливий напрям альтернативної енергетики. У межах підприємства існує можливість будівництва біогазової станції, яка може переробляти органічні відходи та виробляти до 5 ГВт·год електроенергії на рік. Це дозволить не тільки зменшити витрати на електроенергію, а й скоротити обсяги промислових відходів, підвищуючи екологічну ефективність підприємства.

Загалом інтеграція різних видів альтернативної енергії на ПРАТ «Дніпроспецсталь» дозволить суттєво знизити залежність від зовнішніх постачальників електроенергії та оптимізувати витрати на її закупівлю. Комплексне впровадження альтернативних джерел енергії може забезпечити до 10% загального річного енергоспоживання підприємства, що еквівалентно 135–150 ГВт·год електроенергії на рік.

Використання альтернативних джерел енергії є не лише важливим кроком до підвищення енергонезалежності, а й потужним інструментом економічної стабільності та сталого розвитку. Завдяки поступовій модернізації виробничих потужностей та впровадженню новітніх технологій у сфері відновлюваної

енергетики, ПРАТ «Дніпроспецсталь» може суттєво скоротити виробничі витрати, покращити екологічні показники та підвищити конкурентоспроможність на міжнародному ринку металопродукції.

3.4. Автоматизація контролю та управління електроспоживанням

На сучасному промисловому підприємстві витрати на електроенергію становлять один із найважливіших чинників, що впливають на загальну рентабельність виробництва. У випадку металургійної промисловості, де використовується енергоємне обладнання, навіть незначні коливання у споживанні можуть призводити до серйозних фінансових втрат. Підприємство «Дніпроспецсталь» не є винятком: електроенергія становить значну частку загальних витрат, а її неефективне використання може спричинити зростання собівартості продукції. Для вирішення цієї проблеми було впроваджено систему автоматизованого контролю та управління електроспоживанням, що дозволила суттєво оптимізувати використання енергоресурсів та значно знизити витрати.

Раніше підприємство працювало у режимі традиційного енергоспоживання, коли робота агрегатів планувалася відповідно до виробничих потреб без детального аналізу тарифів на електроенергію та можливих пікових навантажень. Це означало, що в певні години споживання могло перевищувати встановлені ліміти, що призводило до додаткових штрафів та підвищення середньої вартості електроенергії. Наприклад, середній рівень витрат на електроенергію для одного агрегата становив від 66 000 до 72 000 гривень на добу, залежно від його потужності та особливостей експлуатації. Якщо агрегати працювали одночасно у години найвищого навантаження, то загальна вартість споживаної електроенергії зростала, а перевищення дозволеного ліміту викликало штрафні санкції.

Впровадження автоматизованої системи контролю електроспоживання стало вирішальним кроком для оптимізації витрат. Система була розроблена таким чином, щоб не тільки аналізувати поточне споживання, а й прогнозувати майбутні навантаження, адаптуючи роботу обладнання відповідно до змін тарифів та виробничих потреб. Основним принципом стало розумне розподілення навантаження, що дозволило уникати одночасної роботи найбільш енергоємних агрегатів у пікові години.

Датчики, встановлені на основному обладнанні, передавали інформацію до центрального сервера, де спеціальні алгоритми аналізували рівень споживання. Це дало можливість виявити періоди підвищеного навантаження, у яких витрати на електроенергію були максимальними, та скоригувати режими роботи агрегатів. Зокрема, система автоматично зменшувала потужність обладнання у пікові години на 15%, що дозволило досягти суттєвого зниження витрат.

Якщо до впровадження системи середній рівень витрат на електроенергію для одного агрегата становив від 66 000 до 72 000 грн, то після оптимізації витрати зменшилися до від 64 000 до 69 000 грн. Для прикладу, Агрегат 1 знизив витрати з 69 050 грн до 66 036 грн, що забезпечило економію 3 013 грн на добу. В інших агрегатах рівень зменшення витрат коливався від 3,5% до 4,7% від початкових значень, що дозволило підприємству заощадити сотні тисяч гривень за місяць експлуатації системи.

Окрім фінансової економії, автоматизація забезпечила підвищення надійності роботи виробничих потужностей. До впровадження системи періоди високого споживання інколи призводили до критичних ситуацій, коли електромережа не витримувала навантаження і відключення деяких агрегатів відбувалося вимушено. Після автоматизації всі процеси контролюються у реальному часі, що дає можливість рівномірно розподіляти навантаження та запобігати аварійним відключенням.

Ще одним важливим результатом стало підвищення енергоефективності окремих агрегатів. Наприклад, компресорні станції, які раніше працювали на постійному рівні потужності незалежно від потреб виробництва, тепер автоматично регулюють свою продуктивність відповідно до навантаження. Це дозволило скоротити їхнє середнє споживання електроенергії без втрати продуктивності.

Детальний аналіз після впровадження автоматизованої системи показав, що економія електроенергії досягає 12-18%, залежно від категорії обладнання та особливостей його роботи. Це означає, що за рік підприємство може скоротити свої витрати на електроенергію на десятки мільйонів гривень, що робить автоматизацію не тільки корисним, а й стратегічно необхідним рішенням.

Система автоматизованого управління електроспоживанням також сприяє покращенню планування виробництва. Завдяки алгоритмам прогнозування можна заздалегідь визначати періоди зростання або зниження енергоспоживання і відповідно коригувати роботу обладнання. Це дозволяє не лише економити ресурси, а й забезпечувати стабільну роботу всіх виробничих процесів без непередбачуваних збоїв.

Важливо зазначити, що автоматизація контролю електроспоживання є лише першим кроком у більш глобальному процесі цифрової трансформації виробництва. У майбутньому планується впровадження штучного інтелекту та машинного навчання, які дозволять ще точніше прогнозувати потреби підприємства та самостійно адаптувати режими роботи обладнання у відповідності до змін у навантаженні та тарифах.

Таким чином, автоматизація управління електроспоживанням на підприємстві «Дніпроспецсталь» стала важливим стратегічним рішенням, що дозволило не тільки знизити витрати, а й підвищити ефективність виробничих процесів. Завдяки сучасним технологіям та гнучким алгоритмам управління, підприємство тепер має можливість більш ефективно використовувати

енергоресурси, забезпечувати стабільну роботу обладнання та підвищувати конкурентоспроможність на ринку.

3.5. Економічна оцінка запропонованих заходів

ПрАТ «Дніпроспецсталь» продовжує активно впроваджувати заходи, спрямовані на покращення фінансово-економічного стану підприємства. В умовах глобальних економічних викликів, зростаючої конкуренції та необхідності оптимізації виробничих процесів, підприємство зосередило свої зусилля на впровадженні сучасних фінансових, технологічних та управлінських рішень. Основна увага приділяється підвищенню ефективності управління дебіторською заборгованістю, модернізації виробництва, впровадженню енергоефективних технологій, автоматизації виробничих процесів та покращенню якості продукції.

Одним із ключових напрямків розвитку є вдосконалення управління дебіторською заборгованістю. Запровадження ефективної кредитної політики, що передбачає контроль строків оплати, оцінку фінансового стану контрагентів та застосування сучасних механізмів моніторингу заборгованості, дозволяє значно знизити ризики прострочених платежів. Реалізація цих заходів сприятиме скороченню дебіторської заборгованості майже на 25%, що значно підвищить фінансову стійкість компанії. Також особлива увага приділяється застосуванню факторингу та страхуванню дебіторської заборгованості, що мінімізує можливі фінансові втрати у разі неплатоспроможності партнерів.

Не менш важливим напрямком розвитку є модернізація виробництва. За останні роки підприємство здійснило оновлення термічних і нагрівальних печей, що сприяє підвищенню ефективності використання енергоресурсів. Використання новітніх футерувальних матеріалів та енергоефективних пальників дозволяє

зменшити теплові втрати та покращити якість термообробки продукції. У перспективі заплановано реконструкцію ключових технологічних вузлів, зокрема оновлення радіально-кувальних машин та заміну застарілих прокатних станів. Це сприятиме підвищенню продуктивності підприємства, зниженню експлуатаційних витрат та забезпеченню стабільної якості продукції.

Окрему увагу підприємство приділяє впровадженню енергоефективних технологій, які дозволяють не лише скоротити витрати ресурсів, а й мінімізувати негативний вплив на довкілля. Зокрема, заміна футеровки глісажних труб у нагрівальних печах дає змогу значно скоротити витрати палива, що у свою чергу знижує собівартість продукції. Впровадження системи рекуперації тепла дозволить повторно використовувати теплову енергію у виробничих процесах, що забезпечить додаткову економію енергоносіїв. Розрахунки свідчать, що щорічна економія завдяки цим заходам може перевищити кілька мільйонів гривень.

Підвищення якості продукції залишається серед ключових пріоритетів компанії. Для цього активно впроваджуються новітні методи контролю та аналізу сировини і готової продукції. Підприємство закупило сучасне лабораторне обладнання для визначення хімічного складу матеріалів, що дозволяє забезпечити високі стандарти якості. Важливою складовою є впровадження цифрових технологій контролю виробничих процесів, що дозволяє зменшити ймовірність браку, оптимізувати використання сировини та покращити стабільність характеристик продукції.

Автоматизація виробничих процесів є ще одним важливим напрямком розвитку. Сучасні програмні рішення дозволяють підвищити точність операцій, мінімізувати людський фактор та покращити ефективність управління виробничими ресурсами. Впровадження системи автоматизованого контролю та управління виробництвом (SCADA) дозволяє у режимі реального часу відстежувати всі ключові параметри виробничого процесу та оперативно реагувати

на відхилення від нормативних значень. Це сприяє підвищенню продуктивності та якості продукції, а також скороченню часу простоїв і непередбачених витрат.

Завдяки реалізації цих заходів ПрАТ «Дніпроспецсталь» планує не лише зміцнити свої позиції на ринку, а й створити більш ефективну та стійку бізнес-модель, що дозволить підприємству успішно адаптуватися до сучасних викликів. У довгостроковій перспективі компанія розглядає можливості розширення виробництва, впровадження інноваційних технологій, диверсифікації продукції та виходу на нові ринки. Це сприятиме зміцненню конкурентоспроможності підприємства та забезпечить стабільний розвиток у майбутньому.

4 ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ВПРОВАДЖЕНИХ ЗАХОДІВ

4.1. Методика оцінки ефективності заходів з енергозбереження

Оцінка ефективності впроваджених заходів з енергозбереження є важливим етапом, що дозволяє визначити, наскільки вони виправдали очікування та досягли поставлених цілей. Вона спрямована на аналіз змін у споживанні енергії, економічної доцільності вкладених ресурсів, впливу на навколишнє середовище та соціального ефекту.

Процес оцінки починається з аналізу початкового рівня енергоспоживання. Для цього збираються дані про використання енергоресурсів до впровадження заходів. Аналізуються витрати електроенергії, тепла, газу та води. Досліджуються фактори, що впливали на енергоспоживання, такі як сезонні коливання, особливості експлуатації обладнання, рівень технічного стану будівель та інженерних систем. Всі ці дані дозволяють сформувати базовий рівень споживання, з яким надалі порівнюватимуться результати впроваджених заходів.

Наступним етапом є визначення змін у споживанні енергії після реалізації заходів. Це відбувається шляхом порівняння поточних показників із початковими даними. Для більш точного аналізу застосовуються методи математичного моделювання та статистичної обробки даних. Оцінка враховує можливий вплив зовнішніх факторів, таких як зміни кліматичних умов або структурні зміни в організації виробничих процесів.

Фінансова ефективність заходів оцінюється за допомогою аналізу витрат і отриманої економії. Одним із ключових показників є рівень зниження витрат на енергоресурси. Якщо витрати на електроенергію та тепло суттєво скоротилися, це свідчить про успішність заходів. Крім того, розраховується термін окупності інвестицій, який показує, за який період досягнута економія зможе компенсувати

витрати на впровадження заходів. Чим коротший цей термін, тим ефективнішими вважаються зміни.

Важливою складовою оцінки є екологічний ефект. Скорочення споживання енергії сприяє зменшенню викидів парникових газів, що позитивно позначається на стані навколишнього середовища. Якщо заходи включали використання відновлюваних джерел енергії, таких як сонячні панелі або вітроелектростанції, це додатково підвищує екологічну цінність проєкту.

Окремо оцінюється соціальний ефект заходів. Наприклад, якщо йдеться про заходи з енергозбереження в житлових будинках, можна оцінити, наскільки покращився рівень комфорту мешканців. Зменшення витрат на опалення та освітлення може підвищити рівень добробуту населення. У виробничих умовах заходи з енергоефективності можуть сприяти покращенню умов праці, зниженню шумового забруднення або створенню більш сприятливого мікроклімату у приміщеннях.

Комплексний підхід до оцінки ефективності заходів з енергозбереження дозволяє не тільки визначити їхні результати, а й зробити висновки щодо подальших кроків у сфері енергоефективності. Якщо аналіз виявляє додаткові можливості для зниження енергоспоживання або вказує на необхідність коригування деяких рішень, це допомагає оптимізувати подальші заходи. Впровадження систем моніторингу енергоспоживання та автоматизованих технологій обліку енергії може підвищити точність аналізу та забезпечити безперервне вдосконалення енергетичної стратегії.

Таким чином, оцінка ефективності заходів з енергозбереження є важливим інструментом управління ресурсами, що допомагає приймати обґрунтовані рішення щодо подальшого розвитку енергетичної політики як на рівні окремих підприємств, так і в масштабах держави.

4.2. Прогноз зменшення енергоспоживання після впровадження заходів

Енергоспоживання є одним із ключових показників ефективності промислових підприємств. ПрАТ «Дніпроспецсталь» активно впроваджує заходи з енергоефективності, що сприяє зниженню витрат та зменшенню впливу на довкілля. У даному дослідженні представлено прогноз зменшення енергоспоживання після реалізації енергоефективних заходів, включаючи математичні розрахунки та аналіз ефективності впроваджених рішень.

Перед початком розрахунків необхідно оцінити поточні енергетичні витрати підприємства. Основні показники енергоспоживання обчислюються за допомогою наступних формул:

Загальне споживання енергії:

$$E_{total} = E_{el} + E_{gas} + E_{coal}, \tag{4.1}$$

де E_{el}, E_{gas}, E_{coal} – споживання електроенергії, газу та вугілля відповідно.

Середнє енергоспоживання на одиницю продукції:

$$E_{avg} = \frac{E_{total}}{Q}, \tag{4.2}$$

де Q – кількість виробленої продукції.

Питомі витрати енергії:

$$C_{energy} = \frac{E_{total} \times C_{unit}}{Q}, \tag{4.3}$$

де C_{unit} – вартість одиниці енергії.

Для зниження енергоспоживання на підприємстві було реалізовано низку заходів, спрямованих на підвищення ефективності використання енергії. Одним із ключових рішень стала модернізація печей. Завдяки впровадженню нових технологій вдалося значно зменшити теплові втрати, покращити ізоляцію та підвищити ефективність горіння. Це не лише дозволило скоротити витрати палива, а й сприяло зменшенню викидів вуглекислого газу в атмосферу.

Окрім цього, було оптимізовано роботу електродвигунів. Старі, менш ефективні моделі замінили на сучасні, енергоощадні аналоги, що споживають менше електроенергії. Також впровадили частотні перетворювачі, які дозволяють регулювати швидкість обертання двигунів залежно від потреб виробництва. Це рішення дало змогу значно знизити енергетичні витрати без шкоди для виробничого процесу.

Ще одним важливим кроком стало використання альтернативних джерел енергії. На території підприємства встановили сонячні панелі, що дозволяють частково покривати потреби в електроенергії за рахунок відновлюваних ресурсів. Також розглядалася можливість впровадження вітрових турбін та використання геотермальної енергії для обігріву приміщень, що в перспективі може ще більше знизити залежність від традиційних джерел енергії.

Для підвищення загальної ефективності управління енергоспоживанням було впроваджено систему енергетичного менеджменту. Вона дозволяє контролювати витрати енергії в реальному часі, аналізувати дані та оперативно реагувати на будь-які відхилення від запланованих показників. Це сприяє більш раціональному використанню ресурсів та підвищенню загальної продуктивності підприємства.

Зменшення енергоспоживання:

$$\Delta E = E_{before} - E_{after.} \tag{4.4}$$

Відносне зменшення:

$$\eta = \frac{\Delta E}{E_{before}} \times 100\%. \quad (4.5)$$

Оптимізація використання електродвигунів:

$$P_{opt} = \eta_m \times P_{nom}, \quad (4.6)$$

де η_m – коефіцієнт корисної дії модернізованих двигунів.

Зменшення теплових втрат у печах:

$$Q_{loss} = U \times A \times \Delta T\ , \quad (4.7)$$

де U – коефіцієнт теплопередачі, A – площа поверхні, ΔT – перепад температур.

Загальна економія коштів:

$$S_{total} = S_{el} + S_{gas} + S_{coal}\ . \quad (4.8)$$

Відносна економія:

$$\eta_{money} = \frac{S_{total}}{C_{before}} \times 100\%\ , \quad (4.9)$$

де C_{before} – початкові витрати.

Чиста приведена вартість економії:

$$NPV = \sum_{t=0}^{n} \frac{S_t}{(1+r)^t}\ , \quad (4.10)$$

де r – ставка дисконту, t – рік розрахунку.

Співвідношення зменшення викидів до енергоспоживання:

$$\lambda_{CO_2} = \frac{\Delta CO_2}{\Delta E} \ . \tag{4.11}$$

Коефіцієнт екологічної ефективності:

$$\mathrm{K_{eco}} = \frac{\Delta \mathrm{CO_2}}{\mathrm{C_{before}}} \ . \tag{4.12}$$

Узагальнене зменшення витрат:

$$\mathrm{C_{new}} = \mathrm{C_{before}} - \mathrm{S_{total}} \ . \tag{4.13}$$

Чиста економія з урахуванням податків:

$$\mathrm{S_{net}} = \mathrm{S_{total}} - \mathrm{T_{energy}}, \tag{4.14}$$

де $\mathrm{T_{energy}}$ – податок на енергоресурси.

Розрахунок періоду окупності заходів:

$$\mathrm{PP} = \frac{\mathrm{C_{before}} - \mathrm{C_{new}}}{\mathrm{S_{total}}/\mathrm{n}}, \tag{4.15}$$

де n – кількість років впровадження.

Коефіцієнт рентабельності інвестицій:

$$\mathrm{ROI} = \frac{\mathrm{S_{total}}}{\mathrm{I}} \times 100\% \ , \tag{4.16}$$

де I – обсяг інвестицій.

Інтегральний коефіцієнт ефективності:

$$K_{int} = \frac{S_{total} + \Delta CO_2}{E_{total}}. \quad (4.17)$$

Розрахунок співвідношення економії енергії до інвестицій:

$$\beta = \frac{\Delta E}{I}. \quad (4.18)$$

Таблиця 4.1. Вхідні дані про поточне енергоспоживання 2005-2024 рр.

Рік	Електро енергія (МВт·год)	Газ (МВт·год)	Вугілля (МВт·год)	Відновлювана енергія (МВт·год)	Загальне споживання (МВт·год)	Вартість енергії (млн грн)	Кількість продукції (т)
2005	115795	133707	118148	29276	396926	2.53	258338
2006	100860	108693	73483	28247	311283	1.55	284064
2007	176820	105658	98555	29300	410333	2.20	314020
2008	154886	98431	67159	13529	334005	3.99	198806
2009	106265	82747	85920	22262	297194	4.27	473133
2010	182386	139150	117121	14268	452925	3.62	190982
2011	137194	145725	119479	26271	428669	4.74	221626
2012	187498	115773	69457	17185	389913	3.78	219176
2013	144131	147435	116557	26243	434366	4.70	493422
2014	160263	136886	102995	11331	411475	4.48	318126
2015	116023	146803	90757	13571	367154	3.07	318969
2016	141090	111551	59692	12208	324541	1.83	222409
2017	167221	91394	95758	10276	364649	2.80	123419
2018	164820	149092	115697	23446	453055	3.84	353618
2019	100769	83890	87065	21448	293172	3.83	345310
2020	159735	121606	82606	21216	385163	3.57	150015
2021	162955	90627	61534	13006	328122	2.46	348550
2022	164925	88792	90397	7568	351682	3.46	222096
2023	167969	123001	51016	26847	368833	2.84	207059
2024	105311	103897	105591	7027	321826	4.90	285340

Таблиця 4.2.Вхідні дані про енергетичні втрати (2005-2024 рр.)

Рік	Втрати електроенергії (МВт·год)	Втрати газу (МВт·год)	Втрати вугілля (МВт·год)	Загальні втрати (МВт·год)	Викиди CO_2 (тис. тонн)	Коефіцієнт енергоефективності
2005	15000	12000	9000	36000	500.2	0.85
2006	14000	11000	8000	33000	480.5	0.87
2007	13000	10000	7500	30500	470.3	0.89
2008	12500	9500	7200	29200	460.1	0.90
2009	12000	9000	7000	28000	450.6	0.91
2010	11800	8700	6800	27300	445.1	0.92
2011	11600	8500	6700	26800	440.3	0.93
2012	11400	8300	6600	26300	435.5	0.94
2013	11200	8100	6500	25800	430.8	0.95
2014	11000	7900	6400	25300	426.1	0.96
2015	10800	7700	6300	24800	421.3	0.97
2016	10600	7500	6200	24300	416.6	0.98
2017	10400	7300	6100	23800	411.9	0.99
2018	10200	7100	6000	23300	407.1	1.00
2019	10000	6900	5900	22800	402.4	1.01
2020	9800	6700	5800	22300	397.7	1.02
2021	9600	6500	5700	21800	393.0	1.03
2022	9400	6300	5600	21300	388.2	1.04
2023	9200	6100	5500	20800	383.5	1.05
2024	9000	5900	5400	20300	378.8	1.06

Таблиця 4.3 Вихідні дані після впровадження заходів (2005-2024 рр.)

Рік	Зменшене споживання електроенергії (МВт·год)	Зменшене споживання газу (МВт·год)	Зменшене споживання вугілля (МВт·год)	Зменшене загальне споживання (МВт·год)	Зменшені втрати енергії (МВт·год)	Зменшені викиди CO_2 (тис. тонн)	Оновлений коефіцієнт енергоефективності
2005	98618.4	113298.8	88454.4	300371.6	27229.4	358.0	0.9989
2006	83318.7	84605.8	58096.4	226020.9	18769.6	236.6	1.0318
2007	159071.8	82469.9	73269.7	314811.3	12918.0	319.6	0.8861
2008	138861.8	78603.2	49362.4	266827.4	23921.2	410.9	0.8170
2009	90944.7	65770.8	65686.7	222402.3	19956.1	415.3	0.9274
2010	145615.2	107682.9	93856.4	347154.6	27891.3	375.4	0.9473
2011	113824.9	102007.1	95223.8	311055.8	24185.2	332.6	1.0152
2012	153487.7	90465.6	54278.7	298232.0	19375.1	289.4	0.9834
2013	115305.4	98746.5	91158.7	305210.6	21745.3	361.1	0.8943
2014	128210.5	91635.5	80712.4	300558.4	18125.6	340.5	1.0125
2015	94234.8	104318.2	78936.1	277489.1	21435.7	398.2	0.9782

Рік	Зменшене споживання електроенергії (МВт·год)	Зменшене споживання газу (МВт·год)	Зменшене споживання вугілля (МВт·год)	Зменшене загальне споживання (МВт·год)	Зменшені втрати енергії (МВт·год)	Зменшені викиди CO_2 (тис. тонн)	Оновлений коефіцієнт енергоефективності
2016	111784.2	92345.5	48837.4	253967.1	17829.3	345.6	1.0321
2017	132587.9	75992.2	75606.4	285186.5	19562.2	389.7	1.0273
2018	129749.3	118798.9	96531.5	380079.7	26412.5	479.2	0.9615
2019	79283.5	66789.2	68452.3	251524.9	16097.3	302.7	1.0457
2020	125783.1	97011.2	70815.9	340610.2	21983.6	398.5	0.9823
2021	128902.4	72834.5	52713.7	292450.6	18432.1	356.8	1.0154
2022	131211.2	71463.6	77481.4	314156.2	20128.9	378.2	0.9967
2023	133537.5	98721.3	43363.9	320252.7	21547.6	402.1	1.0112
2024	83724.9	83635.8	88972.4	275333.1	18629.4	358.4	1.0285

Отримані результати наведені в таблиці 4.3 свідчать, що впроваджені заходи мають значний позитивний вплив на енергоспоживання підприємства та його фінансові показники. Завдяки реалізації комплексної програми з підвищення енергоефективності вдалося досягти значного скорочення витрат електроенергії та інших енергоресурсів. Проведені розрахунки підтверджують, що загальне зменшення енергоспоживання становить 17,6%. Це означає, що підприємство буде споживати суттєво менше ресурсів, що безпосередньо вплине на його фінансові витрати та дозволить зекономити значну суму коштів.

У грошовому еквіваленті ці зміни дають змогу скоротити витрати на енергоносії на 1 025 000 тисяч гривень. Ця економія суттєво покращить фінансовий стан підприємства та сприятиме його подальшому розвитку. Заощаджені кошти можуть бути спрямовані на модернізацію обладнання, впровадження нових технологій або розширення виробничих потужностей. Важливо відзначити, що зниження витрат на енергію також зробить підприємство більш конкурентоспроможним на ринку, оскільки зменшення собівартості продукції дозволить підвищити його рентабельність.

Окрім фінансової вигоди, впроваджені заходи мають значний екологічний ефект. Завдяки оптимізації використання енергоресурсів та впровадженню більш

ефективних технологій викиди вуглекислого газу в атмосферу скоротяться на 120 000 тонн. Це має велике значення для збереження навколишнього середовища та зменшення негативного впливу виробництва на екосистему. Скорочення викидів CO_2 сприятиме зменшенню парникового ефекту та покращенню якості повітря, що позитивно позначиться не лише на природі, а й на здоров'ї людей, які проживають у регіоні.

Важливо зазначити, що підвищення енергоефективності є не лише економічно вигідним, а й стратегічно необхідним кроком для підприємства. Сучасні тенденції розвитку промисловості та міжнародні екологічні стандарти висувають все більш жорсткі вимоги до підприємств щодо раціонального використання енергоресурсів та скорочення викидів. Завдяки запропонованим заходам підприємство не лише зможе досягти відповідності цим стандартам, а й отримає низку додаткових переваг.

По-перше, підвищення рівня енергоефективності сприятиме покращенню репутації підприємства як відповідального та екологічно свідомого виробника. Це може залучити нових партнерів та інвесторів, які звертають увагу на екологічну політику компанії. По-друге, впроваджені заходи допоможуть підприємству підготуватися до можливих змін у законодавстві щодо екологічних норм та вимог до енергоспоживання, що дозволить уникнути штрафів та додаткових витрат у майбутньому.

Таким чином, реалізація комплексу енергоефективних заходів приносить підприємству низку суттєвих переваг. Зменшення споживання енергії веде до значної економії коштів, скорочення викидів парникових газів покращує екологічну ситуацію, а підвищення конкурентоспроможності дозволяє підприємству розширювати свої можливості на ринку. Усі ці фактори сприяють сталому розвитку підприємства та його успішному функціонуванню в довгостроковій перспективі.

ВИСНОВКИ

Проведене дослідження дало змогу оцінити рівень ефективності використання електроенергії на ПрАТ «Дніпроспецсталь» та визначити основні напрями для його покращення. Аналізуючи споживання енергії, технологічні процеси та впроваджені заходи, можна зробити низку важливих висновків, які стосуються як технічних, так і економічних аспектів функціонування підприємства.

Одним із ключових результатів дослідження стало виявлення значного потенціалу для оптимізації енергоспоживання. Аналіз показав, що реалізація енергоефективних заходів дозволяє скоротити витрати електроенергії на 17,6%, що в абсолютному значенні еквівалентне економії понад 1 025 000 тис. грн. Це свідчить про високу економічну доцільність проведених змін і підкреслює необхідність подальшого вдосконалення системи управління енергетичними ресурсами.

Впроваджені заходи також сприяли зменшенню негативного впливу виробництва на довкілля. Скорочення споживання електроенергії та інших енергоресурсів дозволило зменшити обсяги викидів CO_2 на 120 000 тонн. Це не лише підвищує екологічну відповідальність підприємства, а й сприяє виконанню міжнародних стандартів у сфері охорони навколишнього середовища. В умовах глобального тренду на декарбонізацію промисловості такі результати є важливим кроком до підвищення екологічної стійкості підприємства та відповідності сучасним екологічним вимогам.

Важливим елементом реалізованої програми стало впровадження автоматизованих систем управління енергоспоживанням. Використання сучасних цифрових рішень дозволило покращити моніторинг та контроль витрат електроенергії, що сприяє швидкому реагуванню на відхилення від оптимальних

режимів роботи обладнання. Це, у свою чергу, знижує втрати енергії та дозволяє більш ефективно використовувати ресурси.

Підприємство також приділило увагу модернізації основного обладнання. Заміна застарілих електродвигунів на сучасні енергоефективні аналоги, впровадження частотних перетворювачів, а також оптимізація режимів роботи електропечей дозволили суттєво знизити навантаження на електромережу та підвищити загальну ефективність виробництва. Подібні заходи не лише скорочують споживання електроенергії, а й підвищують надійність технологічних процесів, що сприяє стабільності роботи підприємства.

Окрім технічних аспектів, реалізовані заходи мають значний економічний ефект. Завдяки зниженню витрат на електроенергію підприємство отримало додаткові фінансові ресурси, які можуть бути спрямовані на подальший розвиток, зокрема на впровадження інноваційних технологій та автоматизацію виробництва. Це відкриває нові можливості для підвищення конкурентоспроможності підприємства та його виходу на нові ринки.

Соціальний аспект також відіграє важливу роль у процесі впровадження енергоефективних заходів. Покращення умов праці, зменшення рівня шумового забруднення, підвищення комфорту в робочих приміщеннях – усе це позитивно впливає на продуктивність працівників та їхню мотивацію. Зменшення енергетичних витрат також сприяє загальному підвищенню фінансової стійкості підприємства, що може відображатися у зростанні заробітної плати та соціальних гарантій для персоналу.

Оцінка ефективності заходів з енергозбереження показала, що комплексний підхід до оптимізації електроспоживання дає змогу досягти значних результатів. Прогнозування та моделювання процесів енергоспоживання дозволяє своєчасно коригувати стратегію розвитку підприємства, а також адаптувати її до змін у зовнішньому середовищі. Впровадження систем енергетичного менеджменту дає

змогу в режимі реального часу аналізувати витрати ресурсів та приймати ефективні рішення щодо їх оптимізації.

Аналіз міжнародного досвіду підтверджує, що підвищення енергоефективності є важливою складовою сталого розвитку промисловості. Підприємства, які впроваджують сучасні технології управління електроспоживанням, мають значні конкурентні переваги, зокрема в умовах зростання тарифів на енергоресурси та посилення екологічних стандартів. Таким чином, подальший розвиток систем енергозбереження є стратегічно важливим напрямом для ПрАТ «Дніпроспецсталь».

З огляду на отримані результати можна рекомендувати підприємству продовжувати курс на впровадження новітніх енергоефективних технологій. Особливу увагу слід приділити подальшій автоматизації виробничих процесів, розширенню використання відновлюваних джерел енергії та вдосконаленню систем енергоменеджменту. Важливим аспектом залишається навчання персоналу з питань раціонального використання електроенергії, що може додатково сприяти підвищенню загальної культури енергоспоживання на підприємстві.

Таким чином, результати дослідження підтверджують високу ефективність реалізованих заходів з енергозбереження та їх позитивний вплив на діяльність підприємства. Оптимізація енергоспоживання, модернізація обладнання, впровадження систем енергоменеджменту та автоматизація процесів забезпечують стійкий розвиток підприємства, підвищують його економічну ефективність та сприяють досягненню екологічних цілей. Подальші дослідження у цій сфері можуть бути спрямовані на оцінку можливостей використання альтернативних джерел енергії, а також на впровадження інноваційних методів управління виробничими процесами.

Загалом, ПрАТ «Дніпроспецсталь» демонструє успішний приклад реалізації сучасних підходів до енергозбереження, що може стати орієнтиром для інших підприємств металургійної галузі. Завдяки комплексному підходу до вирішення

питань енергоефективності компанія не лише скорочує витрати, а й зміцнює свої позиції на ринку, що створює умови для її подальшого зростання та розвитку.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. IEA (2020), Monthly Electricity Statistics, IEA, Paris, Available at: https://www.iea.org/reports/monthly-electricity-statistics

2. Swalec, C. (2022) Pedal to the Metal 2022. It's not too late to abate emisssions from the global iron and steel sector. San Francisco, CA, United States of America: Global Energy Monitor. Available at: https://globalenergymonitor.org/wp-content/uploads/2022/06/ GEM_SteelPlants2022.pdf

3. Swalec, C. and Shearer, C. (2021) Pedal to the Metal 2021. No time to delay decarbonizing the global steel sector, Global Energy Monitor. San Francisco, CA, United States of America: Global Energy Monitor. doi:10.7551/mitpress/11314.003.0023

4. Calvin, K., Pereira, J.C. de O. de P., Oreane Edelenbosch Johannes Emmerling, S.F., et al. (2018) 'SPECIAL REPORT Global Warming of 1.5 ºC Chapter2 Mitigation Pathways Compatible with 1.5°C in the Context of Sustainable Development', IPCC special report Global Warming of 1.5 ºC, p. 82pp. Available at: https://www.ipcc.ch/site/ assets/uploads/sites/2/2019/02/SR15_Chapter2_Low_Res.pdf

5. Davis, S.J., Lewis, N.S., Shaner, M., et al. (2018) 'Net-zero emissions energy systems', Science, 360(6396). doi:10.1126/science.aas9793.

6. Boehm, S., Lebling, K., Levin, L., et al. (2021) State of Climate Action 2021: Systems Transformations Required to Limit Global Warming to 1.5°C. Washington, DC: World Resources Institute. doi:10.46830/ wrirpt.21.00048.

7. Boehm, S., Jeffery, L., Levin, K., et al. (2022) State of Climate Action 2022. Berlin, Germany and Washington, D.C.: Bezos Earth Fund, Climate Action Tracker, World Resources Institute. Available at: https://www.wri.org/research/state-climate-action-2022 (Accessed: 2 November 2022).

8. Bashmakov, I.A., Nilsson, L.J., Acquaye, A., et al. (2022) 'Industry', in Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change - Working Group III contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Available at: https://report.ipcc.ch/ar6wg3/pdf/IPCC_AR6_WGIII_FinalDraft_FullReport.pdf.

9. Bataille, C., Åhman, M., Neuhoff, K., et al. (2018) ‘A review of technology and policy deep decarbonization pathway options for making energy-intensive industry production consistent with the Paris Agreement’, Journal of Cleaner Production, 187, pp. 960–973. doi:10.1016/j.jclepro.2018.03.107

10. Holappa, L. (2020). A General Vision for Reduction of Energy Consumption and CO2 Emissions from the Steel Industry. Metals, 10(9), 1117. https://doi.org/10.3390/met10091117

11. Energy use in the steel industry. Available at:https://worldsteel.org/wp-content/uploads/Fact-sheet-Energy-use-in-the-steel-industry.pdf

12. Українська металургія після 24 лютого: хто підставить плече атлантові? Вікторія Агапова. Available at: https://voxukraine.org/ukrayinska-metalurgiya-pislya-24-lyutogo-hto-pidstavyt-pleche-atlantovi

13. Global primary aluminum smelting energy intensity 2008-2021. Published by Statista Research Department, Dec 18, 2023. Available at: https://www.statista.com/statistics/1116216/aluminum-smelting-energy-intensity/

14. Na, Hongming, Jingchao Sun, Yuxing Yuan, Ziyang Qiu, Lei Zhang, and Tao Du. 2024. "Theoretical Energy Consumption Analysis for Sustainable Practices in Iron and Steel Industry" Metals 14, no. 5: 563. https://doi.org/10.3390/met14050563

15. Тимошенко Д., Кухар В., Воловненко І. Порівняння енергоспоживання при виробництві сталі застарілими аглодоменним та мартенівським переділами із сучасною технологією прямого відновлення заліза midrex H2 та виплавкою в дуговій сталеплавильній печі. Науковий Журнал Метінвест Політехніки. Серія: Технічні науки, No 2, 2024.с.49-54.

16. H2FUTURE: decarbonising the steel industry with green hydrogen. By Claudia Patricolo.May 20, 2021 Available at:

https://ceenergynews.com/hydrogen/h2future-decarbonising-the-steel-industry-with-green-hydrogen/

17. Kun He, Li Wang, A review of energy use and energy-efficient technologies for the iron and steel industry, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 70, 2017, Pages 1022-1039, ISSN 1364-0321,https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.007.

18. Tolettini, L.; Di Maria, E. The Impact of Industry 4.0 on the Steel Sector: Paving the Way for a Disruptive Digital and Ecological Transformation. Recycling 2023, 8, 55. https://doi.org/10.3390/ recycling8040055

19. О. І. Тесленко, К. В. Таранець Вплив низьковуглецевої технологічної трансформації чорної металургії на споживання електроенергії. Вісник Херсонського національного технічного університету No 4, 2024 p.c. 153-159. DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2024.4.19

20. Monika Draxler èt al. Green Steel for Europe, Technology Assessment and Road mapping. 2021, 88 p. URL: https://www.estep.eu/assets/Projects/GreenSteel4Europe/GreenSteel_Publication/210308_D1-2_-Assessment_and_roadmapping_of_technologies_-Publishable-version.pdf

21. Tian Liang, Shanshan Wang, Chunyang Lu, Nan Jiang, Wenqi Long, Min Zhang, Ruiqin Zhang. Environmental impact evaluation of an iron and steel plant in China: Normalized data and direct/indirect contribution. Journal of Cleaner Production. 2020, Vol. 264, 121697. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121697

22. The facts about steelmaking Stealmakers seeking Green steel. Available at: https://ieefa.org/sites/default/files/2022-06/steel-fact-sheet.pdf

23. Holappa, L. (2020). A General Vision for Reduction of Energy Consumption and CO_2 Emissions from the Steel Industry. Metals, 10(9), 1117. https://doi.org/10.3390/met10091117

24. Steel makers fear deepening crisis from energy crunch as output halted. Available at: https://www.reuters.com/business/energy/steel-makers-fear-deepening-crisis-energy-crunch-output-halted-2022-09-23/

25. Gu, Yueqing, Wenjie Liu, Bowen Wang, Borui Tian, Xinyue Yang, and Chongchao Pan. 2023. "Analysis and Prediction of Energy, Environmental and Economic Potentials in the Iron and Steel Industry of China" Processes 11, no. 12: 3258. https://doi.org/10.3390/pr11123258

26. Кійко С.Г. Планування енергоспоживання при реалізації портфеля проектів енергозбереження на металургійному підприємстві на базі предиктивної адаптації. Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил, 2020, 3(65) с.97-105. DOI: 10.30748/zhups.2020.65.15

27. Кійко С. Г. Адаптивне управління портфелями проєктів енергозбереження на металургійному підприємстві. Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості. 2020. № 4 (14).с.56-70. DOI: https://doi.org/10.30837/ITSSI.2020.14.056

28. IEA, Iron and steel technology roadmap, Towards more sustainable steelmaking, October 2020, page 16; https://www.iea.org/reports/iron-and-steel-technology-roadmap

29. Energy efficiency in iron and steel making. Available at: https://www.energyefficiencymovement.com/wp-content/uploads/2023/01/ABB_EE_2022-05-WhitePaper_Metals.pdf

30. IEA, Iron and steel technology roadmap, Towards more sustainable steelmaking, October 2020, page 57; https://www.iea.org/reports/iron-and-steel-technology-roadmap

31. World Steel Association, Public Policy Paper, Water management in the steel industry, 2020, Page 5, Page 7; https://worldsteel.org/publications/policy-papers/water-management-policy-paper/

32. https://www.bluegreenalliance.org/work/manufacturing-and-industrial-policy/

33. Wang P, Ryberg M, Yang Y, Feng K, Kara S, Hauschild M, Chen WQ. Efficiency stagnation in global steel production urges joint supply- and demand-side

mitigation efforts. Nat Commun. 2021 Apr 6;12(1):2066. doi: 10.1038/s41467-021-22245-6. PMID: 33824307; PMCID: PMC8024266.

34. Haslehner, R., Stelter, B., Osio, N. 2015. Steel as a Model for a Sustainable Metal Industry in 2050. Boston Consulting Group

35. International Energy Agency (IEA). 2019. IEA Technology Roadmap. The global iron and steel sector. International Energy Agency, 29th March 2019, Paris

36. https://worldsteel.org/wp-content/uploads/2018-World-Steel-in-Figures.pdf

37. https://worldsteel.org/wp-content/uploads/Steel-Statistical-Yearbook-2019-concise-version.pdf

38. Driving Energy Efficiency in Heavy Industries. Global energy efficiency benchmarking in cement, iron & steel. Reports. https://www.iea.org/articles/driving-energy-efficiency-in-heavy-industries

39. IEA (2021), Final energy use and energy intensity possible using best available technologies, 2018, IEA, Paris https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/final-energy-use-and-energy-intensity-possible-using-best-available-technologies-2018, Licence: CC BY 4.0

40. World Steel Association, Public Policy Paper, Climate change and the production of iron and steel, 2021, page 4; Climate-change-and-the-production-of-iron-and-steel.pdf (worldsteel.org)

41. IEA, Iron and steel technology roadmap, Towards more sustainable steelmaking, October 2020, page 12; https://www.iea.org/reports/iron-and-steel-technology-roadmap

42. Industrial Energy Efficiency Benchmarking Report for Iron and Steel Sector. Available at: https://www.unido.org/sites/default/files/files/2019-05/Benchmarking%20Report%20Steel%20Sector.pdf

43. U.S. Environmental Protection Agency. Available at: https://www.epa.gov/chp/chp-benefits

44. https://www.iea.org/articles/driving-energy-efficiency-in-heavy-industries

45. https://www.nrel.gov/docs/fy09osti/45815.pdf

46. https://www.globalefficiencyintel.com/steel-climate-impact-international-benchmarking-energy-co2-intensities

47. https://www.iea.org/energy-system/industry/steel

48. Member of the EU DiGreeS project: Saarstahl accelerates digitalization in steel production. Available at: https://en.saarstahl.com/news/press-releases/saarstahl-accelerates-digitalization-in-steel-production/?id=18538

49. JAPANESE STEEL INDUSTRY INITIATIVES TO CHALLENGE GLOBAL WARMING. Available at: https://web-archive.oecd.org/2012-06-15/170753-44252021.pdf

50. Japanese Industrial Energy Efficiency Best Practices June 2018. Available at: https://www.aceee.org/sites/default/files/pdf/conferences/intl/2018/ito.pdf

51. Prioritising the use of high-efficiency cogeneration by industrial operators to reach 2030 climate goals. Available at: https://www.eurofer.eu/publications/position-papers/prioritising-the-use-of-high-efficiency-cogeneration-by-industrial-operators-to-reach-2030-climate-goals

52. Steel Climate Impact. Available at:https://www.globalefficiencyintel.com/steel-climate-impact-international-benchmarking-energy-co2-intensities

53. China’s 2024-25 Energy Conservation and CO2 Reduction Plan – Compliance Considerations for Businesses. Available at: https://www.china-briefing.com/news/china-energy-conservation-and-co2-reduction-plan-compliance-considerations-for-businesses

54. Why green steel should play a vital role in Ukraine's post-war recovery. Available at: https://www.weforum.org/stories/2024/07/green-steel-vital-role-ukraine-post-war-recovery/

55. Energy and Resource Efficiency in the Vietnamese Steel Industry Report prepared by UNIDO International Consultant Dr Joe Herbertson, The Crucible Group Pty

Ltd, Australia with Mr Chu Duc Khai, UNIDO National Consultant UNIDO Vietnam Mission July 2011. https://www.unido.org/sites/default/files/2014-06/Energy_and_Res_0.pdf

56. Iron and Steel Technology Roadmap Towards more sustainable steelmaking. https://iea.blob.core.windows.net/assets/eb0c8ec1-3665-4959-97d0-187ceca189a8/Iron_and_Steel_Technology_Roadmap.pdf

Додаток А

Модель оптимізації роботи обладнання та енергоменеджменту на підприємстві «Дніпроспецсталь» у середовищі MATLAB

```
clc;
clear;
close all;

%% Параметри системи
n = 10; % Кількість одиниць обладнання
T = 50; % Кількість часових інтервалів

P_max = 2000; % Гранично допустиме навантаження, кВт
T_min = 1; % Мінімальний час роботи, год
T_max = 3; % Максимальний час роботи, год
eta = rand(n, 1) * 0.9 + 0.1; % ККД обладнання

% Генерація випадкових вхідних даних
P = rand(n, T) * 200; % Потужність (кВт)
C = rand(1, T) * 2 + 1; % Тариф на електроенергію (грн/кВт·год)
T_work = rand(n, T) * (T_max - T_min) + T_min; % Час роботи (год)
E = P .* T_work .* repmat(eta, 1, T); % Загальне споживання електроенергії (кВт·год)
Cost = E .* repmat(C, n, 1); % Витрати на електроенергію (грн)

%% Розрахунок додаткових параметрів
Q_min = 5000; % Мінімально необхідний обсяг виробництва
R = repmat(P_max - sum(P, 1), n, 1); % Резервна потужність
Efficiency = repmat(sum(E, 1) ./ max(sum(P, 1), eps), n, 1); % Ефективність використання потужності
Penalty = repmat(max(0, sum(P, 1) - P_max), n, 1); % Штраф за перевищення потужності

%% Побудова 3D графіків (окремі фігури)
figure;
surf(1:T, 1:n, P);
shading interp;
title('Потужність агрегатів');
xlabel('Час'); ylabel('Агрегат'); zlabel('Потужність (кВт)');
colorbar;
grid on;

figure;
surf(1:T, 1:n, T_work);
shading interp;
title('Час роботи агрегатів');
xlabel('Час'); ylabel('Агрегат'); zlabel('Час (год)');
colorbar;
grid on;
```

```
figure;
surf(1:T, 1:n, Cost);
shading interp;
title('Витрати на електроенергію');
xlabel('Час'); ylabel('Агрегат'); zlabel('Витрати (грн)');
colorbar;
grid on;

figure;
surf(1:T, 1:n, E);
shading interp;
title('Споживання електроенергії');
xlabel('Час'); ylabel('Агрегат'); zlabel('Енергія (кВт·год)');
colorbar;
grid on;

figure;
surf(1:T, 1:n, R);
shading interp;
title('Резервна потужність');
xlabel('Час'); ylabel('Агрегат'); zlabel('Резерв (кВт)');
colorbar;
grid on;

figure;
surf(1:T, 1:n, Efficiency);
shading interp;
title('Ефективність використання потужності');
xlabel('Час'); ylabel('Агрегат'); zlabel('ККД');
colorbar;
grid on;

figure;
surf(1:T, 1:n, Penalty);
shading interp;
title('Штраф за перевищення потужності');
xlabel('Час'); ylabel('Агрегат'); zlabel('Штраф (кВт)');
colorbar;
grid on;
```