МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

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

Електричної інженерії та кіберфізичних систем
(повна назва кафедри)

Кваліфікаційна робота

перший (бакалаврський) рівень
(рівень вищої освіти)

на тему Оптимізація електроспоживання прокатного виробництва шляхом впровадження режимних та організаційних заходів

Виконав: студент 4 курсу, групи
спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(код і назва спеціальності)
спеціалізації
(код і назва спеціалізації)
освітньої програми Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(назва освітньої програми)
Аушев Д.О.
(ініціали та прізвище)

Керівник д.т.н., проф. Коваленко В.Л.
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)
Рецензент к.т.н., доц. Башлій С.В.
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Запоріжжя
2026

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Інженерний навчально-науковий інститут ім. Потебні Ю.М.
Кафедра електричної інженерії та кіберфізичних систем
Рівень вищої освіти перший (бакалаврський) рівень
Спеціальність 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(код та назва)
Спеціалізація
(код та назва)
Освітня програма Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

ЗАТВЕРДЖУЮ
в. о. Завідувач кафедри
к.т.н., доц. Д.М. Морозов
« » 2026 року

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

Аушеву Дмитру Олександровичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1 Тема роботи Оптимізація електроспоживання прокатного виробництва шляхом впровадження режимних та організаційних заходів
керівник роботи Коваленко Віктор Леонідович, д.т.н., проф.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом ЗНУ від « 23 » грудня 2025 року № 1833 - с
2 Строк подання студентом роботи 11 червня 2026 р.
3 Вихідні дані до роботи: найбільшими споживачами електричної енергії є термічні печі, апарати зварювання, електродвигунне навантаження верстатів, освітлення та вентиляція.
4 Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1) Аналіз можливостей впровадження заходів з економії електричної енергії цеху 2) Впровадження заходів щодо підвищення ефективності електроспоживання цеху 3) Техніко-економічне обґрунтування впровадження енергозберігаючих заходів.
5 Перелік графічного матеріалу 1) Аналіз електроспоживання цеху 2) Схема однолінійна 3) План розміщення обладнання цеху 4) Механізм переміщення електродів 5) Схема металорізального верстата 6) Модернізація системи вентиляції 7) Техніко-економічні показники підвищення ефективності електроспоживання цеху.
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		

7 Дата видачі завдання 01.02.2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРЯМІВ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ЦЕХУ ГАРЯЧОЇ ПРОКАТКИ ПАТ «ЗАПОРІЖСТАЛЬ»	01.03.2026	
2	Впровадження заходів щодо підвищення ефективності електроспоживання цеху	01.04.2026	
3	Техніко-економічне обґрунтування заходів із підвищення енергоефективності цгптл	10.05.2026	

Студент _____ Д. О. Аушев
(підпис) (ініціали та прізвище)

Керівник роботи _____ В.Л. Коваленко
(підпис) (ініціали та прізвище)

Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер _____ С.В. Башлій
(підпис) (ініціали та прізвище)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка складається з 155 сторінок**,** містить 6 рисунків**,** 31 таблицю та 20 використаних джерел**.** У роботі комплексно досліджено питання підвищення енергетичної ефективності цеху гарячої прокатки тонкого листа ПАТ «Запоріжсталь». Основну увагу приділено аналізу фактичної структури енергоспоживання виробничого підрозділу, визначенню найбільш енергоємних технологічних процесів та пошуку практичних резервів зниження витрат паливно-енергетичних ресурсів.

У теоретичній частині розкрито сутність енергозбереження та енергоефективності на промисловому підприємстві, розглянуто основні чинники, що впливають на рівень споживання електричної та теплової енергії у прокатному виробництві. Охарактеризовано технологічний процес гарячої прокатки, структуру цеху, склад основного та допоміжного обладнання, а також особливості роботи нагрівальних печей, прокатного стану, насосних, вентиляційних, трансформаторних і транспортних систем.

В аналітичній частині виконано оцінювання енергоспоживання цеху за основними видами енергоресурсів. Визначено обладнання, яке формує найбільшу частку електричного та теплового навантаження. До найбільш енергоємних споживачів віднесено нагрівальні агрегати, головні електроприводи прокатних клітей, трансформаторні підстанції, насосні установки, вентиляційні системи, рольганги, механізми підйому вантажів та системи виробничого освітлення.

На підставі проведеного аналізу сформовано комплекс режимних, організаційних і технічних заходів з підвищення енергоефективності. До них належать оптимізація роботи трансформаторної підстанції, вирівнювання графіка навантажень, зміна режимів роботи вантажопідіймальних механізмів, упровадження графіків увімкнення та вимкнення освітлення, вентиляції й

теплових завіс, компенсація реактивної потужності, скорочення холостого ходу обладнання та вдосконалення систем енергетичного обліку.

Для кожного запропонованого заходу визначено очікуваний обсяг річної економії електричної енергії. Розрахунки виконано з урахуванням потужності обладнання, фактичної тривалості його роботи, режимів завантаження та можливого скорочення непродуктивних витрат. Отримані результати дозволили оцінити сумарний потенціал енергозбереження цеху та визначити пріоритетність реалізації окремих проєктів.

Окрему увагу в роботі приділено техніко-економічному обґрунтуванню запропонованих заходів. Економічну доцільність їх упровадження оцінено не лише за величиною річної економії, а й за системою інвестиційних показників. Зокрема, визначено простий та дисконтований строки окупності, чисту теперішню вартість проєкту NPV**,** внутрішню норму рентабельності IRR та індекс дохідності інвестицій PI**.**

Використання цих показників дало змогу врахувати зміну вартості грошей у часі, обсяг початкових капіталовкладень, тривалість розрахункового періоду та очікувані грошові потоки від економії енергоресурсів. Такий підхід дозволив порівняти запропоновані заходи між собою та визначити проєкти, які характеризуються найкращим співвідношенням між обсягом інвестицій, економічним ефектом і строком повернення вкладених коштів.

У результаті виконаного дослідження обґрунтовано доцільність поетапного впровадження комплексу енергозберігальних заходів у цеху гарячої прокатки. Реалізація запропонованих рішень дозволить знизити споживання електричної енергії, скоротити експлуатаційні витрати, підвищити надійність роботи обладнання та поліпшити загальні показники енергоефективності виробництва.

Практичне значення роботи полягає в можливості використання отриманих результатів під час планування модернізації енергетичного господарства цеху, формування внутрішньої програми енергозбереження та прийняття інвестиційних рішень на ПАТ «Запоріжсталь». Запропонований

комплекс заходів може бути реалізований як одночасно, так і окремими етапами залежно від фінансових можливостей підприємства та технічної готовності виробничих систем.

ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ, ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ПРОЦЕС, ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ, МОДЕРНІЗАЦІЯ, ЕНЕРГОАУДИТ, ГАРЯЧА ПРОКАТКА

ЗМІСТ

Вступ..... 9
1 ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРЯМІВ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ЦЕХУ ГАРЯЧОЇ ПРОКАТКИ ПАТ «ЗАПОРІЖСТАЛЬ» 18
1.1 Теоретичні основи та зміст енергозбереження в діяльності промислового підприємства 18
1.2 Чинники зниження енергетичних витрат на промисловому підприємстві..... 37
1.3 Опис об’єкта дослідження ПАТ «Запорізький металургійний комбінат “Запоріжсталь” 47
1.4 Технологія виробництва та основне обладнання цеху гарячої прокатки тонкого листа 55
1.5 Аналіз енергоспоживання ЦГПТЛ..... 66
1.6 Можливі заходи підвищення енергоефективності у галузі обробки металу тиском..... 75
1.7 Аналіз можливих заходів з підвищення енергетичної ефективності цеху гарячої прокатки 77
1.8 Техніко-економічне обґрунтування впровадження.... 79
2 Розрахунок заходів з підвищення ефективності електроспоживання ЦГПТЛ ПАТ «Запоріжсталь» 84
2.1 Оптимізація роботи трансформаторної підстанції 84
2.1.1 Виведення недовантажених трансформаторів в резерв….....100
2.2 Зміна режиму роботи механізму підйому вантажу 109
2.3 Упровадження графіків вмикання та вимикання систем освітлення, вентиляції й повітряно-теплових завіс 119

2.4 Розрахунок зниження витрати електричної енергії за рахунок вирівнювання графіку навантажень дільниці…….126
3 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ЗАХОДІВ ІЗ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ЦГПТЛ..... 132
3.1 Методичні засади оцінювання економічної ефективності енергозберігальних заходів..... ...132
3.2 Загальний комплексний проект 142
Висновки 146
Перелік посилань..... 153

ВСТУП

Однією з найважливіших передумов стабільного розвитку промислових підприємств, зниження собівартості продукції та підвищення загальної економічної ефективності виробництва є раціональне й ощадливе використання енергетичних ресурсів. У сучасних умовах енергія виступає не лише допоміжним ресурсом, необхідним для забезпечення технологічних процесів, а й одним із визначальних чинників конкурентоспроможності підприємства. Вартість електричної енергії, природного газу, теплової енергії, палива та інших енергоносіїв безпосередньо впливає на рівень виробничих витрат, кінцеву ціну продукції, фінансові результати діяльності підприємства та його здатність зберігати позиції на внутрішньому і зовнішньому ринках.

Особливо актуальним питання енергозбереження є для промислових підприємств України, значна частина яких тривалий час експлуатує морально й фізично застаріле технологічне обладнання. Таке обладнання нерідко характеризується підвищеним споживанням енергетичних ресурсів, значними втратами електричної та теплової енергії, недостатньою автоматизацією виробничих процесів і низькою точністю регулювання технологічних параметрів. У результаті підприємства змушені витрачати значно більше енергоресурсів на виробництво одиниці продукції, ніж сучасні модернізовані виробництва.

Енергозберігаючий напрям розвитку вітчизняної економіки може бути реалізований лише за умови системного підходу до управління енергоспоживанням. Йдеться не про здійснення окремих, випадкових або короткострокових заходів, а про розроблення та послідовне виконання комплексних програм енергозбереження на рівні кожного підприємства. Такі програми повинні враховувати особливості технологічних процесів, структуру споживання енергоресурсів, технічний стан обладнання, режим роботи

виробничих підрозділів, обсяги випуску продукції, фінансові можливості підприємства та перспективи його подальшого розвитку.

Для ефективного формування і реалізації програм енергозбереження необхідна відповідна методологічна та методична база. Вона повинна охоплювати принципи проведення енергетичного аудиту, методи обліку й аналізу енергоспоживання, правила визначення питомих витрат енергії, процедури оцінювання енергетичної ефективності обладнання, а також механізми вибору найбільш доцільних енергозберігаючих заходів. Важливе значення має також розроблення системи показників, за допомогою яких можна об'єктивно оцінювати досягнуті результати, порівнювати фактичне енергоспоживання з нормативними значеннями та своєчасно виявляти необґрунтовані втрати енергоресурсів.

Відсутність системної роботи у сфері енергозбереження або відкладання реалізації відповідних заходів призводить до значних економічних збитків. Підприємство продовжує сплачувати за надмірно спожиту електроенергію, природний газ, паливо та інші ресурси, хоча частини цих витрат можна було б уникнути шляхом модернізації обладнання, поліпшення організації виробництва або впровадження автоматизованого контролю. У довгостроковій перспективі такі втрати накопичуються, зменшуючи прибутковість підприємства та обмежуючи його інвестиційні можливості.

Негативні наслідки недостатньої уваги до енергозбереження не обмежуються лише фінансовою сферою. Надмірне споживання палива та енергії збільшує навантаження на енергетичну інфраструктуру, сприяє зростанню викидів забруднювальних речовин і парникових газів, підвищує обсяги утворення промислових відходів. Це погіршує загальну екологічну ситуацію в промислових регіонах і може негативно впливати на стан здоров'я населення. Крім того, високі виробничі витрати ускладнюють збереження робочих місць, стримують підвищення заробітної плати та знижують соціально-економічну стабільність регіонів, у яких розташовані великі промислові підприємства.

Отже, енергозбереження необхідно розглядати як комплексне завдання, що одночасно має економічне, технологічне, екологічне та соціальне значення. Раціональне використання енергоресурсів дозволяє підприємству зменшувати виробничі витрати, підвищувати надійність обладнання, поліпшувати якість продукції, скорочувати негативний вплив на навколишнє середовище та створювати передумови для сталого розвитку.

Ефективність використання енергетичних ресурсів є одним із найважливіших показників результативності роботи підприємства в цілому. За рівнем питомого енергоспоживання можна оцінювати технічний стан виробництва, ступінь досконалості застосовуваних технологій, ефективність організації праці та якість управління виробничими процесами. Якщо підприємство споживає надмірну кількість енергії при незмінному обсязі випуску продукції, це може свідчити про зношеність обладнання, нераціональні режими його роботи, недостатній контроль за технологічними параметрами або невиправдані простої.

Для металургійних підприємств проблема енергетичної ефективності має особливе значення. Металургійне виробництво належить до найбільш енергоємних галузей промисловості. Виплавка чавуну та сталі, нагрівання металу, його прокатування, термічна обробка, транспортування сировини і напівфабрикатів потребують значних обсягів електричної енергії, природного газу, коксу, пари, води, стисненого повітря та інших ресурсів. У структурі собівартості металургійної продукції енергетичні витрати становлять вагому частку, тому навіть відносно невелике підвищення ефективності використання енергії може забезпечити суттєвий економічний результат.

Для підприємств металургійного комплексу енергозбереження фактично стає однією з умов збереження життєздатності. Висока енергоємність продукції робить їх особливо чутливими до зміни тарифів на електроенергію, вартості природного газу та інших енергоносіїв. Якщо енергетичні витрати зростають швидше, ніж ціна реалізації металопродукції, прибутковість підприємства зменшується. За таких умов модернізація технологій, оптимізація режимів

роботи обладнання й скорочення непродуктивних втрат енергії стають не просто бажаними заходами, а необхідністю.

Одним із важливих виробничих підрозділів металургійного підприємства є прокатний цех. Саме тут нагріті металеві заготовки проходять обробку тиском і перетворюються на листовий або сортовий прокат, профілі та інші види готової продукції. Прокатне виробництво включає велику кількість взаємопов'язаних операцій: нагрівання заготовок у печах, їх транспортування до прокатних станів, деформацію металу між валками, охолодження, різання, правлення, термічну обробку, пакування та переміщення готової продукції.

Кожна із зазначених операцій потребує значної кількості енергії. Нагрівальні печі споживають паливо для доведення металу до температури, необхідної для прокатування. Потужні електроприводи прокатних станів забезпечують обертання робочих валків і подолання значних механічних навантажень. Насосні, вентиляційні, компресорні та транспортні установки підтримують роботу допоміжних систем. Тому в прокатних цехах металургійних підприємств повного циклу споживання первинних енергетичних ресурсів може досягати приблизно 20% від їх загальних витрат по підприємству.

Частка електричної енергії, яка припадає на прокатне виробництво, може бути дещо меншою, однак вона також залишається значною. Наприклад, для металургійного заводу повного циклу сортового напряму структура споживання електроенергії може мати такий вигляд: доменне виробництво споживає близько 4% загального обсягу електроенергії, коксохімічне — приблизно 9%, прокатне — близько 16%, сталеплавильне — орієнтовно 5%. Найбільша частка, що може становити близько 47%, припадає на енергетичне господарство підприємства, яке забезпечує роботу насосних, компресорних, вентиляційних, водопостачальних та інших допоміжних систем. Механічні служби й інші підрозділи можуть споживати ще близько 6%.

Такий розподіл свідчить про те, що енергозбереження не може обмежуватися модернізацією лише основного технологічного обладнання.

Значний потенціал скорочення витрат міститься також у допоміжних системах. Наприклад, втрати можуть виникати через неефективну роботу насосів і вентиляторів, витоки стисненого повітря, надмірне освітлення, нераціональне використання води, тепла та пари. Важливим завданням є узгодження продуктивності допоміжного обладнання з фактичними потребами технологічного процесу.

У прокатних цехах значний ефект може забезпечити оптимізація температурних режимів нагрівальних печей. Надмірний нагрів металу збільшує витрати палива, прискорює окиснення поверхні заготовок і підвищує втрати металу у вигляді окалини. Недостатній нагрів, навпаки, ускладнює прокатування, збільшує навантаження на електроприводи та може погіршувати якість готової продукції. Тому підтримання оптимальної температури металу має одночасно енергетичне, технологічне та економічне значення.

Не менш важливим напрямом є підвищення ефективності електроприводів прокатних станів. Потужні електродвигуни працюють у складних динамічних режимах, що супроводжуються частими прискореннями, гальмуваннями та змінами навантаження. Застосування сучасних перетворювачів частоти, систем автоматичного регулювання та засобів рекуперації енергії дозволяє скорочувати втрати, підвищувати точність керування і зменшувати споживання електроенергії.

Кінцевим результатом діяльності підприємства у сфері енергозбереження є реальне зменшення енерговитрат, тобто фінансових витрат на придбання електроенергії, природного газу, палива, теплової енергії та інших ресурсів. Однак абсолютне скорочення енергоспоживання не завжди може бути єдиним критерієм ефективності. Якщо підприємство нарощує обсяги виробництва, загальне споживання енергії може збільшуватися навіть за умови впровадження ефективних технологій.

Тому при оцінюванні результатів енергозбереження необхідно аналізувати також питомі показники. До них належать витрати енергії на одну тонну продукції, частка енерговитрат у загальній собівартості, споживання

палива на виконання певної технологічної операції та інші показники. Якщо підприємство збільшує випуск продукції, але при цьому скорочує кількість енергії, необхідної для виробництва однієї тонни металу, це свідчить про реальне підвищення енергетичної ефективності.

Зменшення енерговитрат може бути досягнуте різними методами. Найпростішими є організаційні заходи, які не потребують значних капіталовкладень. До них можна віднести дотримання технологічної дисципліни, усунення необґрунтованих простоїв обладнання, своєчасне вимкнення непотрібних споживачів, контроль за дотриманням установлених режимів роботи, проведення регулярного технічного обслуговування та підвищення відповідальності персоналу за використання енергоресурсів.

Наступну групу становлять маловитратні технічні заходи. Вони можуть передбачати встановлення приладів обліку, заміну застарілих освітлювальних приладів, утеплення трубопроводів і теплових агрегатів, усунення витоків газу, води, пари або стисненого повітря, налагодження систем регулювання та відновлення працездатності теплообмінного обладнання. Такі заходи часто мають відносно короткий термін окупності та дозволяють швидко отримати помітний економічний ефект.

Більш складні проєкти пов’язані з модернізацією або повною заміною технологічного обладнання. До них належать реконструкція нагрівальних печей, упровадження систем утилізації вторинного тепла, заміна електродвигунів на енергоефективні моделі, встановлення частотно-регульованих приводів, автоматизація виробничих процесів, модернізація систем електропостачання та компенсація реактивної потужності. Такі заходи потребують значних інвестицій, однак забезпечують довготривалий ефект і можуть суттєво змінити загальний рівень енергетичної ефективності підприємства.

Методи енергозбереження можуть класифікуватися за різними критеріями: за обсягом необхідних витрат, рівнем технічної складності, тривалістю впровадження, строком окупності, наукоємністю, характером

отриманого результату та сферою застосування. Одні заходи спрямовуються на зменшення безпосереднього споживання енергії, інші — на повторне використання вторинних енергетичних ресурсів, удосконалення управління виробництвом або підвищення якості продукції.

Вибір конкретних заходів повинен здійснюватися на основі техніко-економічного аналізу. Недостатньо лише визначити, скільки енергії можна заощадити. Необхідно оцінити розмір капітальних вкладень, строк окупності, можливі технологічні ризики, вплив на продуктивність обладнання, якість продукції, безпеку праці та екологічні показники. Перевагу доцільно надавати тим рішенням, які забезпечують найбільший сумарний ефект і відповідають стратегічним цілям розвитку підприємства.

Важливу роль у реалізації енергозберігаючої політики відіграє енергетичний менеджмент. Він передбачає постійний облік, контроль, аналіз і планування використання ресурсів. На підприємстві повинні бути визначені відповідальні особи або підрозділи, які збирають дані про енергоспоживання, виявляють відхилення, готують пропозиції щодо модернізації та контролюють виконання затверджених заходів. Без постійного моніторингу навіть сучасне обладнання може експлуатуватися неефективно.

Характерним прикладом великого металургійного підприємства, для якого питання енергоефективності має стратегічне значення, є ПАТ «Запоріжсталь». За обсягами виробництва комбінат традиційно входить до четвірки найбільших металургійних підприємств України. Його виробнича діяльність має важливе значення для металургійної галузі, машинобудування, будівництва, харчової промисловості та інших секторів економіки.

Комбінат є виробником широкого асортименту металопродукції. Підприємство випускає чавун, сталь, листовий прокат із вуглецевих, низьколегованих, легованих і нержавіючих сталей, гнуті профілі, жерсть, будівельні матеріали та окремі види товарів народного споживання. Така різноманітність продукції потребує складної виробничої структури, значної кількості технологічного обладнання та великих обсягів енергетичних ресурсів.

«Запоріжсталь» є одним із важливих постачальників листового прокату та гнутих профілів для українських машинобудівних підприємств. Металопродукція комбінату використовується для виготовлення машин, обладнання, металоконструкцій та іншої промислової продукції. Жерсть, яку виробляє підприємство, застосовується у харчовій промисловості, зокрема для виготовлення металевої тари. Отже, стабільність роботи комбінату має значення не лише для самого підприємства, а й для багатьох суміжних галузей.

Великий масштаб виробництва зумовлює значні обсяги споживання природного газу, електроенергії, коксу, тепла, води та інших ресурсів. Тому навіть незначне скорочення питомих витрат енергії може забезпечити істотну економію в масштабах усього підприємства. Водночас реалізація енергозберігаючих заходів дозволяє знижувати собівартість продукції, підвищувати конкурентоспроможність комбінату та скорочувати негативний вплив металургійного виробництва на навколишнє середовище.

Комбінат «Запоріжсталь» послідовно реалізує заходи, спрямовані на скорочення споживання природного газу та покупних енергетичних ресурсів. Така діяльність здійснюється відповідно до технологічної стратегії групи «Метінвест», яка передбачає поступову модернізацію виробничих потужностей, підвищення ефективності технологічних процесів, скорочення непродуктивних втрат і впровадження сучасних енергозберігаючих рішень.

Стабільна динаміка зменшення споживання природного газу може досягатися завдяки вдосконаленню паливних режимів, модернізації нагрівальних агрегатів, використанню вторинних енергетичних ресурсів, підвищенню герметичності газових систем і посиленню контролю за технологічними параметрами. Не менш важливими є автоматизація процесів горіння, контроль співвідношення палива й повітря, зниження теплових втрат і підвищення ефективності використання тепла відхідних газів.

Скорочення споживання покупної електроенергії може забезпечуватися шляхом оптимізації роботи потужних електроприводів, насосів, вентиляторів і компресорів, застосування частотного регулювання, компенсації реактивної

потужності, удосконалення графіків навантаження та підвищення якості обліку електроенергії. Важливе значення має також зменшення втрат у внутрішніх електричних мережах і забезпечення раціонального завантаження трансформаторного обладнання.

Реалізація енергозберігаючих заходів на такому великому підприємстві повинна мати безперервний характер. Після завершення одного етапу модернізації необхідно здійснювати аналіз отриманих результатів, визначати нові резерви економії та формувати наступні інвестиційні проєкти. Енергозбереження не може розглядатися як одноразова кампанія, оскільки технології, тарифи, вимоги до продукції та умови роботи підприємства постійно змінюються.

Таким чином, раціональне використання енергетичних ресурсів є одним із ключових напрямів підвищення ефективності промислового виробництва. Для металургійних підприємств, які характеризуються високою енергоємністю технологічних процесів, енергозбереження має особливо важливе значення. Воно дозволяє не лише скорочувати витрати на енергоносії, а й підвищувати технологічну надійність, поліпшувати якість продукції, зменшувати екологічне навантаження та зміцнювати конкурентні позиції підприємства.

Досвід комбінату «Запоріжсталь» свідчить про необхідність поєднання технічної модернізації, організаційних заходів, автоматизованого контролю та системного енергетичного менеджменту. Саме комплексний підхід створює можливості для стабільного скорочення питомого споживання природного газу, електроенергії та інших ресурсів. У довгостроковій перспективі така політика сприяє економічній стійкості підприємства, збереженню його виробничого потенціалу та формуванню більш енергоефективної моделі розвитку металургійної промисловості України.

1 ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРЯМІВ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ЦЕХУ ГАРЯЧОЇ ПРОКАТКИ ПАТ «ЗАПОРІЖСТАЛЬ»

1.1 Теоретичні основи та зміст енергозбереження в діяльності промислового підприємства

Упродовж 2023–2026 років проблема енергетичної залежності України набула особливої актуальності у зв’язку з воєнними діями, пошкодженням об’єктів енергетичної інфраструктури, скороченням власних генерувальних потужностей і необхідністю збільшення імпорту окремих видів енергоресурсів. Водночас оцінювання рівня енергетичної залежності за цей період ускладнюється неповнотою статистичної інформації. Державна служба статистики України оприлюднила уточнений енергетичний баланс за 2023 рік та оперативні показники за 2024 рік. Публікацію повного енергетичного балансу за 2025 рік було відкладено через умови воєнного стану, а підсумкові дані за 2026 рік станом на 13 липня 2026 року ще не можуть бути сформовані, оскільки звітний рік триває.

За наявними аналітичними даними, у 2023 році Україна імпортувала паливно-енергетичні ресурси орієнтовною вартістю 10,37 млрд дол. США. Цей показник розраховано з урахуванням того, що у 2024 році вартість імпорту енергоресурсів становила 8,9 млрд дол. США, що було на 1,47 млрд дол., або на 14,2%, менше порівняно з попереднім роком. До структури імпорту входили нафта і нафтопродукти, природний газ, вугілля, електрична енергія та інші паливно-енергетичні ресурси. При цьому у 2024 році на нафту і нафтопродукти припадало близько 76,6% загальної вартості енергетичного імпорту.

Суттєво змінилася ситуація у сфері зовнішньої торгівлі електроенергією. У 2023 році Україна імпортувала приблизно 806,4 млн кВт·год електричної енергії, тоді як у 2024 році обсяг імпорту збільшився до 4,44 млрд кВт·год, тобто більш ніж у п’ять разів. Вартість імпортованої електроенергії відповідно зросла зі 154,7 млн дол. США у 2023 році до 669,4 млн дол. США у 2024 році.

Таке зростання значною мірою було зумовлене дефіцитом генерувальних потужностей після масованих пошкоджень українських електростанцій та енергетичних мереж.

Водночас ситуація в окремих сегментах енергетичного сектору була неоднаковою. Зокрема, зниження внутрішнього споживання та збільшення власного видобутку природного газу дозволили Україні наблизитися до газової самодостатності. Протягом опалювального сезону 2023–2024 років Україна фактично не здійснювала комерційного імпорту природного газу для покриття внутрішніх потреб. Однак пошкодження газовидобувної та енергетичної інфраструктури надалі посилило ризики дефіциту й необхідність формування додаткових резервів [1].

У 2025 році вартість імпортованих Україною паливно-енергетичних ресурсів знову збільшилася і досягла приблизно 10,5 млрд дол. США, що на 18,3% перевищувало показник 2024 року. Енергетичні ресурси постачалися з 69 країн світу. Збільшення імпорту було пов’язане насамперед із необхідністю покриття дефіциту природного газу, нафтопродуктів, вугілля та електроенергії. Таким чином, після певного зниження вартості енергетичного імпорту у 2024 році в наступному році знову сформувалася тенденція до її зростання[2,3].

У 2026 році Україна продовжила активно використовувати можливості європейської енергосистеми для компенсації внутрішнього дефіциту електричної енергії. У січні 2026 року імпорт електроенергії досяг рекордного місячного показника — близько 894 млн кВт·год, що приблизно на 40% перевищувало рівень грудня 2025 року. У червні 2026 року Україна імпортувала 295,4 млн кВт·год і експортувала 154,5 млн кВт·год електроенергії, залишаючись нетто-імпортером. Порівняно із червнем 2025 року обсяг імпорту електроенергії збільшився приблизно на 45%. Ці показники є оперативними й характеризують лише окремі місяці 2026 року, а не остаточний річний рівень енергетичної залежності.

Для порівняння, енергетична залежність Європейського Союзу, розрахована як частка чистого імпорту енергії у валовому доступному

енергоспоживанні, у 2023 році становила 58,4%, а у 2024 році зменшилася приблизно до 57%. Отже, понад половину енергетичних потреб ЄС продовжували забезпечувати ресурси зовнішнього походження. Остаточні зіставні річні показники енергетичної залежності ЄС за 2025 та 2026 роки станом на середину 2026 року ще не оприлюднені.

Таким чином, у 2023–2026 роках енергетична залежність України визначалася не тільки співвідношенням власного виробництва та імпорту енергоресурсів, а й здатністю національної енергетичної системи працювати в умовах руйнування інфраструктури, дефіциту генерувальних потужностей і нестабільного споживання. Зменшення залежності від зовнішнього постачання потребує диверсифікації джерел енергії, відновлення та децентралізації генерації, збільшення власного видобутку палива, розвитку відновлюваної енергетики, підвищення енергоефективності промисловості та скорочення питомого споживання паливно-енергетичних ресурсів [4-6].

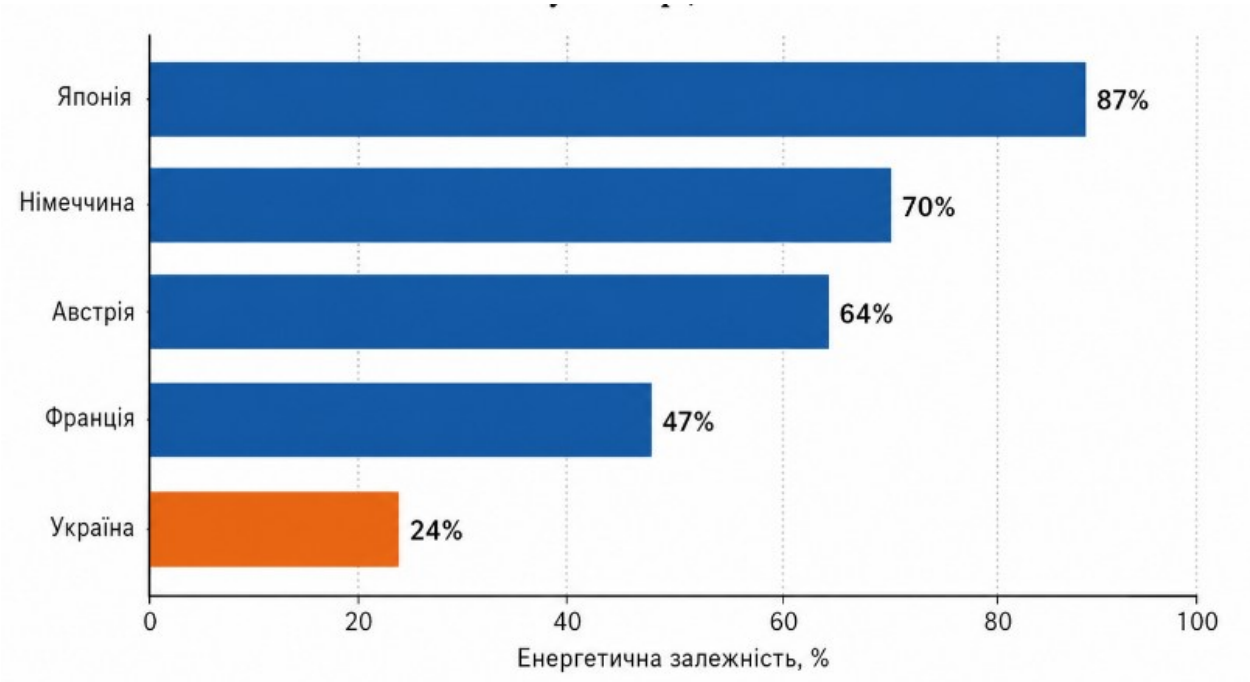


Рисунок 1.1 - Енергетична залежність України та країн світу у 2026р., %

На рисунку 1.1 наведено порівняння рівня енергетичної залежності України та окремих країн світу. Із наведених даних видно, що найвищий рівень енергетичної залежності серед досліджуваних країн має Японія — 87%, що

свідчить про значну потребу цієї країни в імпорті паливно-енергетичних ресурсів. Досить високими є також показники Німеччини — 70% та Австрії — 64%, що характеризує істотну залежність цих держав від зовнішніх джерел енергії. Франція має дещо нижчий рівень енергетичної залежності — 47%, що пояснюється більш диверсифікованою структурою енергозабезпечення, зокрема значною роллю атомної енергетики.

На цьому тлі Україна демонструє найнижчий показник серед наведених країн — 24%. Це означає, що у структурі забезпечення енергетичних потреб частка імпортованих ресурсів є відносно меншою, ніж у більшості порівнюваних держав. Таким чином, за формальним показником енергетичної залежності Україна є менш залежною від зовнішніх постачань енергоресурсів, ніж Японія, Німеччина, Австрія та Франція.

Разом із тим, отримані результати необхідно інтерпретувати обережно. Нижчий рівень енергетичної залежності не завжди означає вищий рівень енергетичної безпеки. Для України цей показник значною мірою пов’язаний не лише з наявністю власних енергетичних ресурсів, а й зі скороченням внутрішнього споживання, структурними змінами економіки, а також особливостями функціонування енергетичного сектору в умовах воєнного стану. Крім того, суттєвий вплив мають пошкодження енергетичної інфраструктури, потреба в імпорті окремих видів палива та електроенергії, а також недостатній рівень диверсифікації постачань.

Таблиця 1.1 – Структура споживання первинної енергії в Україні, країнах ЄС-15, США та світі у 2021–2026 рр., %

Країна / регіон, рік	Нафта та нафтопродукти	Природний газ	Вугілля	Атомна енергія	Гідроенергія	Інші відновлювані джерела	Разом
1	2	3	4	5	6	7	8
Україна, 2021	16,5	28,5	24,0	23,0	1,5	6,5	100
Україна, 2022	17,0	27,5	22,5	24,5	1,5	7,0	100
Україна, 2023	17,0	28,5	21,5	24,0	1,6	7,4	100

Україна, 2024	18,5	27,0	19,5	25,0	1,5	8,5	100
Україна, 2025[1]	19,0	29,0	18,0	24,0	1,5	8,5	100
Україна, 2026[1]	18,5	28,0	17,0	25,0	1,5	10,0	100
ЄС-15, 2021	35,0	25,0	10,0	12,0	3,0	15,0	100
ЄС-15, 2022	36,0	23,0	11,0	11,5	3,0	15,5	100
ЄС-15, 2023	37,0	21,0	9,5	12,0	3,0	17,5	100
ЄС-15, 2024	37,5	20,5	8,5	12,0	3,0	18,5	100
ЄС-15, 2025[1]	37,0	20,0	7,5	12,0	3,0	20,5	100
ЄС-15, 2026[1]	36,0	19,5	7,0	12,0	3,0	22,5	100
США, 2021	36,5	32,5	10,5	8,5	2,5	9,5	100
США, 2022	37,0	33,0	10,0	8,0	2,5	9,5	100
США, 2023	37,5	34,0	9,0	8,0	2,5	9,0	100
США, 2024	38,0	35,0	8,0	8,0	2,5	8,5	100
США, 2025[1]	37,5	35,5	7,5	8,0	2,5	9,0	100
США, 2026[1]	37,0	35,5	7,0	8,0	2,5	10,0	100
Світ, 2021	29,5	23,0	27,5	4,5	2,5	13,0	100
Світ, 2022	30,0	22,5	28,0	4,5	2,5	12,5	100
Світ, 2023	30,2	22,7	27,8	4,7	2,4	12,2	100
Світ, 2024	30,0	22,8	27,5	4,8	2,4	12,5	100
Світ, 2025[1]	29,5	22,8	27,0	4,9	2,4	13,4	100
Світ, 2026[1]	29,0	22,5	26,5	5,0	2,5	14,5	100

[1] Дані за 2025–2026 роки є розрахунковими та прогнозними. Показники округлено до 0,5 відсоткового пункта. До категорії «інші відновлювані джерела» включено біоенергію, сонячну, вітрову, геотермальну енергію та енергію відходів.

Для України базою оцінювання є структура загального енергопостачання за 2023 рік: природний газ — близько 28,5%, атомна енергія — 24%, вугілля — 21,5%, нафта — 17%, гідроенергія — 1,6%.

Для Європи та ЄС враховано поступове скорочення частки природного газу й твердого палива та збільшення ролі відновлюваних джерел. У структурі валової доступної енергії ЄС у 2023 році найбільшу частку займали нафта і нафтопродукти — 37,6%, а природний газ — 20,4% [1-6].

Упродовж 2024–2026 років структура ризиків енергозабезпечення України істотно змінилася. Основною проблемою стала не лише нестача вугілля, брикетованого палива або скрапленого газу, а комплексне пошкодження електрогенерувальних потужностей, газовидобувної інфраструктури, систем передавання електроенергії та централізованого теплопостачання.

Після масованих атак навесні 2024 року доступна диспетчеризована генерувальна потужність України скоротилася приблизно до 12 ГВт, тоді як до 2022 року вона становила близько 38 ГВт. Унаслідок дефіциту власної генерації в 2024 році Україна імпортувала рекордні 4,436 млрд кВт·год електроенергії з європейської енергосистеми.

Одночасно зросли ризики у сфері газопостачання. Якщо протягом опалювального сезону 2023–2024 років внутрішні потреби значною мірою покривалися за рахунок власного видобутку та запасів у підземних сховищах, то атаки на газовидобувні об’єкти на початку 2025 року призвели до тимчасового скорочення видобутку приблизно на 40%. Для підготовки до наступного опалювального сезону потреба України в імпорті природного газу оцінювалася щонайменше у 4,6 млрд м³.

Таким чином, заміщення дефіцитних видів твердого палива природним газом уже не може розглядатися як універсальний напрям підвищення надійності енергозабезпечення, оскільки воно здатне посилювати залежність від зовнішніх поставок газу.

За таких умов актуальним є проведення техніко-економічних розрахунків щодо часткового заміщення природного газу, вугілля, скрапленого газу та інших побутових видів палива електроенергією. Однак масове переведення опалення на прямі електричні нагрівачі без модернізації мереж може призвести до значного збільшення зимового максимуму навантаження, перевантаження трансформаторів і розподільних мереж та подальшого зростання потреби в імпорті електроенергії.

Тому електрифікація теплопостачання має передбачати передусім застосування теплових насосів, електричних котлів із теплоакумуляторами, систем автоматичного керування навантаженням, локальних відновлюваних джерел енергії та накопичувачів.

Особливо перспективним такий підхід може бути для віддалених населених пунктів, гірських і поліських сіл, районів із відсутнім або технічно зношеним газопостачанням, а також для новозбудованих енергоефективних житлових будинків.

У зонах розташування атомних електростанцій використання електроенергії для опалення доцільно розглядати не як автоматичне рішення, а з урахуванням пропускної спроможності місцевих мереж, погодинного балансу потужності, тарифів, можливості керування попитом і встановлення акумуляторів теплової енергії.

У 2024–2025 роках саме три діючі атомні електростанції забезпечували близько половини доступної генерувальної потужності України, що підвищувало їх значення для стабільності енергосистеми, але водночас посилювало ризики надмірної концентрації генерації.

Рівень енергозабезпеченості країни може оцінюватися за показником загального постачання або споживання первинної енергії в розрахунку на одну особу.

Проте використання для сучасної України показника 2005 року — 4,5 т умовного палива на одну особу — є некоректним, оскільки відтоді істотно змінилися чисельність населення, структура промисловості, територіальний

контроль, обсяги виробництва й імпорту енергоресурсів. Крім того, зменшення питомого енергоспоживання в умовах війни не обов’язково свідчить про підвищення енергоефективності: воно значною мірою може бути наслідком скорочення промислового виробництва, руйнування підприємств, міграції населення та примусового обмеження споживання.

Державна служба статистики України оприлюднила оперативні показники енергетичного балансу за 2024 рік, однак повні зіставні річні дані за 2025 рік і, тим більше, за 2026 рік станом на середину 2026 року ще відсутні. Поширення окремих статистичних показників також обмежується неповнотою звітності в умовах воєнного стану.

Через це достовірно визначити єдиний показник первинного енергоспоживання на одну особу за 2024–2026 роки та безпосередньо порівняти його зі США, країнами ЄС, Китаєм, Індією чи Японією поки що неможливо.

Отже, у 2024–2026 роках енергозабезпеченість України доцільно характеризувати не лише питомим споживанням первинної енергії, а комплексом показників: часткою власного виробництва у внутрішньому енергоспоживанні, обсягами імпорту природного газу, нафтопродуктів, вугілля та електроенергії, доступною генерувальною потужністю, тривалістю обмежень електропостачання, пропускною спроможністю міждержавних перетинів і рівнем децентралізації генерації.

Пріоритетними напрямами зменшення енергозалежності мають бути відновлення пошкоджених потужностей, розвиток розподіленої генерації, теплових насосів, когенераційних установок, біоенергетики, сонячної та вітрової енергетики, систем накопичення енергії, термомодернізація будівель і впровадження керованого електричного опалення.

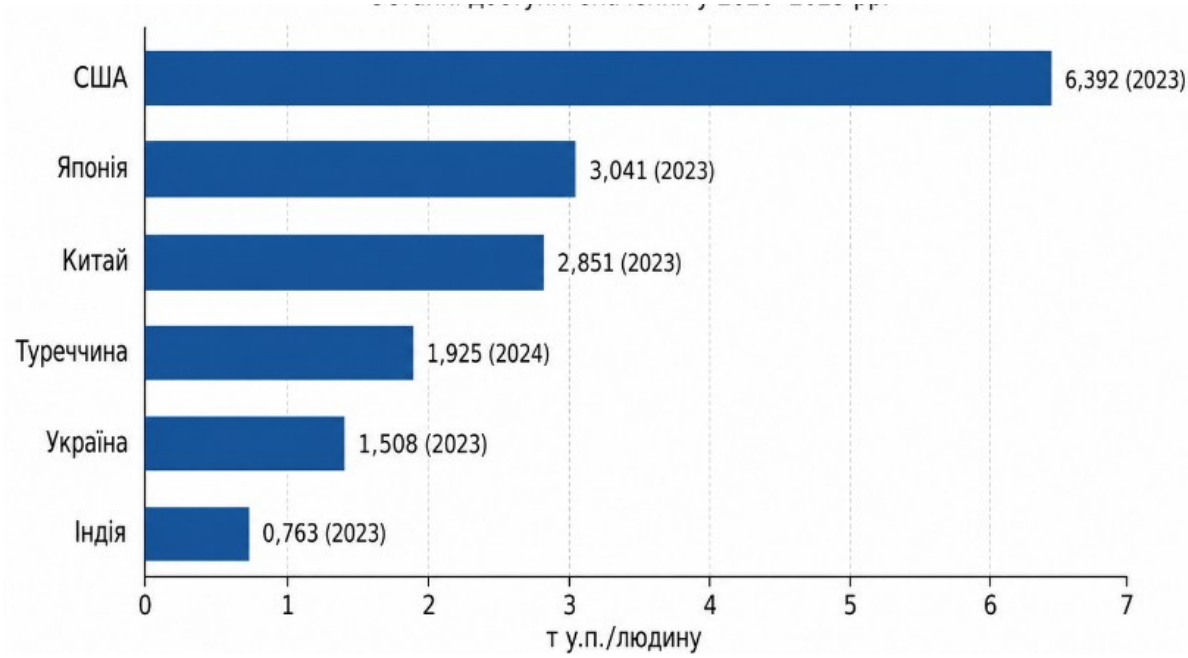


Рисунок 1.2 - Питоме річне споживання первинної енергії у країнах світу, т у.п./людину 2020…..2025рр.

На рисунку 1.2 наведено порівняння питомого річного споживання первинної енергії в окремих країнах світу за останніми доступними статистичними даними. Найвище значення зафіксовано у США — 6,392 т нафтового еквівалента на одну особу. Це приблизно у 4,2 раза перевищує показник України, що свідчить про значно вищий рівень енергозабезпечення американської економіки, поширеність автомобільного транспорту, значні обсяги промислового виробництва та високе побутове споживання енергії.

Японія та Китай характеризуються близькими показниками — відповідно 3,041 і 2,851 т нафтового еквівалента на одну особу. Показник Японії приблизно удвічі перевищує український, а Китаю — майже у 1,9 раза. Високий рівень споживання первинної енергії в цих країнах пов’язаний із масштабами промисловості, транспортного сектору, виробництва електроенергії та загальним рівнем економічної активності.

Туреччина займає проміжне положення з показником 1,925 т нафтового еквівалента на одну особу у 2024 році. Це приблизно на 28% більше, ніж в Україні. Така різниця може пояснюватися активнішим розвитком промислового

виробництва, будівництва, транспорту та зростанням внутрішнього попиту на енергоресурси.

Питоме споживання первинної енергії в Україні становило близько 1,508 т нафтового еквівалента на одну особу. Український показник є майже удвічі вищим, ніж в Індії, однак суттєво поступається показникам США, Японії та Китаю. Водночас відносно низький рівень енергоспоживання України не можна однозначно трактувати як результат підвищення енергоефективності. Його зменшення значною мірою пов’язане зі скороченням промислового виробництва, руйнуванням енергетичної та виробничої інфраструктури, міграцією населення і вимушеними обмеженнями споживання в умовах воєнного стану.

Найнижче значення серед представлених країн спостерігається в Індії — 0,763 т нафтового еквівалента на одну особу. Воно приблизно у 8,4 раза нижче, ніж у США, що відображає значні відмінності в рівнях доходів населення, індустріалізації, забезпеченості транспортом та доступі до сучасних енергетичних послуг.

Отже, рисунок демонструє істотну нерівномірність питомого споживання первинної енергії між країнами. Високе значення показника зазвичай пов’язане з рівнем економічного розвитку та масштабами промисловості, однак не завжди свідчить про ефективне використання енергоресурсів. Для України стратегічним завданням є не механічне збільшення енергоспоживання, а забезпечення достатнього рівня енергопостачання шляхом відновлення генерації, модернізації промисловості, розвитку відновлюваної та розподіленої енергетики, скорочення втрат і підвищення енергоефективності.

Станом на 2024–2025 роки енергомісткість валового внутрішнього продукту України залишається підвищеною порівняно з більшістю країн Європейського Союзу. Водночас наведений у попередніх дослідженнях показник 0,89 кг умовного палива на 1 дол. США за паритетом купівельної спроможності не слід використовувати для характеристики сучасної ситуації,

оскільки він розрахований за застарілою методикою, в іншій ціновій базі та не відповідає актуальним міжнародним статистичним показникам.

Для сучасних міжнародних порівнянь Світовий банк і Міжнародне енергетичне агентство використовують показник споживання енергії в кілограмах нафтового еквівалента на 1000 міжнародних доларів ВВП, розрахованого за постійним паритетом купівельної спроможності 2021 року. За останніми доступними даними, у 2023 році енергомісткість ВВП України становила приблизно 101,4 кг нафтового еквівалента на 1000 дол. США ВВП за ПКС, або 0,101 кг нафтового еквівалента на один міжнародний долар.

Після перерахунку в одиниці умовного палива цей показник відповідає приблизно 0,145 кг умовного палива на 1 міжнародний долар ВВП за ПКС. Для такого перерахунку враховано, що один кілограм нафтового еквівалента приблизно дорівнює 1,4286 кг умовного палива. Отже, сучасне значення енергомісткості української економіки істотно нижче за застарілий показник 0,89 кг у.п./дол., однак залишається високим у європейському порівнянні.

У середньому у світі в 2023 році на виробництво 1000 дол. США ВВП за ПКС витрачалося близько 87,6 кг нафтового еквівалента, або приблизно 0,125 кг умовного палива на один міжнародний долар. Таким чином, показник України перевищував середньосвітовий рівень приблизно в 1,16 раза, а не у 2,6 раза, як зазначалося в попередніх оцінках.

Ще більшою є різниця порівняно з Європейським Союзом. Останнє доступне значення для ЄС за 2024 рік становило близько 50,9 кг нафтового еквівалента на 1000 дол. США ВВП за ПКС, що еквівалентно приблизно 0,073 кг умовного палива на один міжнародний долар. Отже, енергомісткість ВВП України була орієнтовно у два рази вищою, ніж у середньому в ЄС.

Остаточне значення енергомісткості ВВП України безпосередньо за 2024 та 2025 роки поки що не може бути наведене. Державна служба статистики України оприлюднила динамічні ряди енергетичного балансу й енергомісткості ВВП лише до 2023 року. Поширення частини статистичної інформації за наступні роки було відкладене через неповноту звітності в умовах воєнного

стану. Тому значення за 2024–2025 роки не слід визначати шляхом механічної екстраполяції або подавати як офіційні дані.

У 2024 році реальний ВВП України збільшився на 2,9%, а номінальний ВВП досяг 7658,7 млрд грн. Проте за відсутності повного енергетичного балансу цього недостатньо для розрахунку достовірного показника енергомісткості, оскільки необхідні також остаточні дані щодо загального постачання первинної енергії.

Підвищена енергомісткість української економіки зумовлена сукупністю технологічних, структурних і воєнних чинників. Значна частина промислового обладнання, електричних машин, теплотехнічних установок і систем передавання енергії характеризується фізичним та моральним зношенням. Особливо енергоємними залишаються металургійне виробництво, добувна промисловість, хімічна галузь, виробництво будівельних матеріалів, окремі напрями машинобудування, а також централізоване теплопостачання. Використання застарілих електродвигунів, насосів, компресорів, вентиляційних установок, котлів і технологічних печей призводить до підвищених втрат електричної та теплової енергії.

Вагомою проблемою залишається низька енергоефективність житлового й громадського фонду. Недостатня теплоізоляція будівель, зношені внутрішньобудинкові мережі, відсутність індивідуального регулювання опалення та застарілі системи централізованого теплопостачання зумовлюють надмірне споживання природного газу, електроенергії й теплової енергії. За оцінкою МЕА, відновлення житлового фонду України повинно поєднуватися з термомодернізацією, оновленням систем опалення та впровадженням сучасних стандартів енергоефективності, а не обмежуватися простим відтворенням довоєнних конструкцій і технологій.

У 2024–2025 роках на показники енергомісткості також істотно впливали наслідки воєнних дій. Унаслідок атак у період із березня по травень 2024 року Україна втратила близько 9 ГВт генерувальних потужностей, переважно теплової та гідроенергетики. Це скоротило доступну потужність приблизно до

третини довоєнного рівня, збільшило навантаження на вцілілe обладнання та посилило втрати під час передавання і перетворення енергії.

Дефіцит внутрішньої генерації призвів до збільшення імпорту електроенергії. У 2024 році Україна імпортувала рекордні 4,436 млрд кВт·год електричної енергії. Отже, зростання залежності від зовнішнього енергопостачання в цей період було спричинене не лише традиційно високою енергомісткістю виробництва, а й руйнуванням електростанцій, підстанцій, теплових мереж та іншої критичної інфраструктури.

Водночас скорочення споживання енергії в умовах війни не завжди означає реальне підвищення енергоефективності. Зменшення загального попиту може бути наслідком зупинення промислових підприємств, скорочення виробництва, переміщення населення, втрати територій і примусових обмежень електропостачання. Тому оцінювати ефективність української економіки доцільно не лише за загальним показником енергомісткості ВВП, але й за питомими витратами енергії на одиницю конкретної промислової продукції, втратами в електричних і теплових мережах, енергоспоживанням будівель та ефективністю основного технологічного обладнання.

Зниження енергомісткості ВВП України в середньостроковій перспективі потребує прискореної модернізації промислового обладнання, впровадження електродвигунів високих класів енергоефективності, частотно-регульованих електроприводів, систем автоматизованого енергетичного моніторингу, утилізації вторинної теплоти та оптимізації технологічних режимів. Не менш важливими напрямами є термомодернізація будівель, оновлення систем централізованого теплопостачання, розвиток високоефективної когенерації, теплових насосів, розподіленої генерації та накопичувачів енергії.

У сучасних умовах усі заходи, спрямовані на підвищення енергоефективності промислових підприємств, потребують детального техніко-економічного обґрунтування. Це стосується не лише великих проєктів модернізації основного технологічного обладнання, а й упровадження систем енергетичного менеджменту, автоматизованого обліку енергоресурсів,

частотно-регульованих електроприводів, сучасних систем рекуперації тепла, накопичувачів енергії, розподіленої генерації та відновлюваних джерел енергії.

Економічне оцінювання таких заходів не може обмежуватися простим порівнянням початкових витрат із розміром очікуваної економії. Під час ухвалення інвестиційного рішення необхідно враховувати строк служби обладнання, зміну тарифів на електричну енергію і природний газ, інфляцію, вартість залученого капіталу, витрати на ремонт і технічне обслуговування, можливі простої виробництва, екологічний ефект та вплив проєкту на надійність енергопостачання.

Для оцінювання енергозберігальних проєктів доцільно застосовувати показники чистої приведеної вартості, внутрішньої норми дохідності, дисконтованого строку окупності, індексу прибутковості інвестицій і вартості заощадженої одиниці енергії. В умовах воєнного стану особливого значення набувають аналіз чутливості, сценарне моделювання, метод Монте-Карло, коригування ставки дисконту на ризик та оцінювання реальних опціонів. Застосування таких методів дає змогу врахувати невизначеність щодо тривалості воєнних дій, можливих пошкоджень енергетичної інфраструктури, коливання вартості енергоносіїв, дефіциту обладнання, логістичних обмежень і зміни обсягів виробництва.

При цьому економічний ефект від енергозбереження у 2026 році необхідно оцінювати ширше, ніж звичайне зменшення витрат на енергоносії. Підприємство може отримувати додаткові переваги завдяки скороченню тривалості аварійних простоїв, можливості працювати під час обмежень електропостачання, зменшенню пікового навантаження, підвищенню автономності та збереженню виробничої програми. За таких умов інвестиції в енергоефективність фактично перетворюються на інвестиції в безперервність і стійкість господарської діяльності.

Попередня практика розвитку української економіки свідчила про те, що енергозбереження нерідко сприймалося державними органами, підприємствами та населенням як другорядне завдання. Значна частина заходів мала

декларативний характер, а рішення про модернізацію обладнання відкладалися через нестачу фінансових ресурсів, тривалі строки окупності й недостатню відповідальність за перевитрати паливно-енергетичних ресурсів. Проте після початку повномасштабної війни ставлення до енергоефективності суттєво змінилося.

Станом на 2026 рік енергозбереження необхідно розглядати не лише як інструмент скорочення виробничих витрат, а як одну з основних складових енергетичної, економічної та національної безпеки України. Пошкодження електростанцій, підстанцій, газовидобувних об’єктів, теплових мереж та іншої критичної інфраструктури показало, що надмірна енергоємність підприємств безпосередньо посилює їхню вразливість до перебоїв постачання.

Закон України «Про основи національної безпеки України», на який посилалися в попередніх дослідженнях, втратив чинність у 2018 році. Сьогодні відповідні питання регулюються Законом України «Про національну безпеку України», Стратегією енергетичної безпеки та спеціальним Законом України «Про енергетичну ефективність». Останній є чинним і станом на 2026 рік регламентує відносини у сфері енергетичної ефективності, передбачає розвиток енергетичного аудиту, енергетичного менеджменту, енергосервісу та систем моніторингу споживання енергії.

Значення енергоефективності підтверджується масштабом завданих Україні збитків. За результатами четвертої швидкої оцінки шкоди та потреб у відновленні, станом на 31 грудня 2024 року прямі пошкодження енергетичного сектору оцінювалися приблизно у 20,51 млрд дол. США, що майже вдвічі перевищувало попередню оцінку. До цієї суми входило понад 2,5 млрд дол. пошкоджень систем централізованого теплопостачання.

У наступному році руйнування продовжували збільшуватися. П’ята швидка оцінка відновлення та потреб, яка охоплює період до 31 грудня 2025 року, визначила сукупні прямі збитки України на рівні понад 195 млрд дол. США. Енергетика, поряд із житловим фондом і транспортом, залишилася серед

найбільш постраждалих секторів. Загальні потреби у відбудові та відновленні України на наступне десятиліття були оцінені майже у 588 млрд дол. США.

Особливо складною стала ситуація у газовому секторі. За оцінкою Міжнародного енергетичного агентства, атаки на енергетичну інфраструктуру у 2025 році тимчасово порушили роботу приблизно 60% внутрішніх газовидобувних потужностей України, що знову посилило потребу в імпорті природного газу. Для порівняння, під час опалювального сезону 2023–2024 років Україна практично не потребувала комерційного імпорту газу для внутрішнього споживання, оскільки попит забезпечувався власним видобутком і запасами у сховищах.

Отже, енергетична безпека України у 2026 році залежить не тільки від можливості придбати необхідні ресурси на зовнішніх ринках. Вона визначається також здатністю економіки зменшувати попит на енергію без скорочення корисного виробничого результату, оперативно відновлювати пошкоджені об’єкти, розосереджувати генерувальні потужності та підтримувати роботу підприємств за умов обмеженого енергопостачання.

Висока енергоємність економіки має низку негативних наслідків.

По-перше, вона стримує економічне відновлення. Значні витрати на електроенергію, природний газ, тепло та паливо збільшують собівартість української продукції. Підприємства змушені спрямовувати кошти на оплату енергоносіїв і аварійне відновлення обладнання замість інновацій, цифровізації, оновлення основних фондів і підвищення заробітної плати. Особливо гостро ця проблема проявляється в металургії, гірничодобувній, хімічній промисловості та виробництві будівельних матеріалів.

По-друге, надмірне енергоспоживання збільшує залежність від імпортних енергоносіїв. Навіть за наявності власного видобутку газу, вугілля, атомної та відновлюваної генерації Україна змушена імпортувати значні обсяги нафтопродуктів, а в періоди дефіциту — газ та електроенергію. У воєнних умовах така залежність створює додаткові валютні, логістичні й безпекові ризики.

По-третє, низька енергоефективність ускладнює європейську інтеграцію. Європейський Союз послідовно посилює вимоги до енергетичної результативності будівель, промислової продукції, технологій і систем управління. Для українських підприємств це означає необхідність упровадження енергетичного менеджменту, скорочення викидів, підтвердження походження енергії та підвищення прозорості даних про споживання ресурсів.

По-четверте, висока енергоємність має соціальні наслідки. Зростання енергетичних витрат призводить до підвищення тарифів і цін на товари, скорочує реальні доходи населення та посилює енергетичну бідність. У промислових регіонах перебої електро- і теплопостачання впливають не тільки на підприємства, а й на роботу водопостачання, лікарень, закладів освіти та житлово-комунального господарства.

По-п’яте, неефективне використання палива й енергії погіршує екологічну ситуацію. Чим більше палива потрібно для отримання однакового обсягу продукції, тим більшими є викиди парникових газів і забруднювальних речовин. Тому скорочення питомого енергоспоживання одночасно зменшує виробничі витрати, імпортну залежність та антропогенне навантаження на довкілля.

У таких умовах державна політика має поєднувати короткострокові антикризові заходи з довгостроковою модернізацією. До невідкладних завдань належать відновлення пошкоджених енергетичних об’єктів, накопичення резервного обладнання, захист критичної інфраструктури, розвиток міждержавних електричних з’єднань та забезпечення підприємств резервними джерелами живлення.

Одночасно необхідно розвивати децентралізовану генерацію. Розміщення газопоршневих і газотурбінних установок, сонячних електростанцій, систем накопичення енергії, біогазових комплексів і локальних когенераційних установок знижує залежність від великих централізованих об’єктів. Для промислового підприємства така генерація може забезпечувати живлення

найбільш відповідальних механізмів, систем управління, насосів, компресорів, вентиляції та аварійного освітлення.

Важливим інструментом має залишатися енергетичний аудит. Проте в умовах воєнного стану його зміст повинен бути розширений. Аудит має виявляти не тільки джерела перевитрат енергії, а й критичні технологічні процеси, які потребують гарантованого живлення, можливості зниження навантаження у пікові години, потенціал використання вторинних енергоресурсів та доцільність встановлення автономної генерації.

На підприємствах необхідно впроваджувати системи енергетичного менеджменту відповідно до принципів ISO 50001. Така система повинна включати визначення базового рівня енергоспоживання, установлення вимірюваних цілей, постійний облік ресурсів, моніторинг питомих показників і аналіз відхилень. Без достовірного обліку неможливо оцінити реальний результат модернізації або відрізнити економію від звичайного скорочення виробництва [7].

Одним із першочергових напрямів залишається модернізація електроприводів. На промислових підприємствах значну частину електроенергії споживають двигуни насосів, вентиляторів, компресорів, конвеєрів і прокатного обладнання. Використання енергоефективних двигунів, частотних перетворювачів і автоматичного регулювання продуктивності дозволяє скоротити споживання енергії та зменшити пускові струми.

Не менш важливим є використання вторинних енергетичних ресурсів. У металургії значні обсяги тепла втрачаються з димовими газами, нагрітим металом, охолоджувальною водою та технологічними газами. Установлення рекуператорів, теплообмінників і систем утилізації тепла може зменшувати споживання природного газу й забезпечувати технологічне або комунальне теплопостачання.

Державне стимулювання має передбачати пільгове кредитування, часткове гарантування позик, компенсацію відсоткових ставок, податкові стимули та підтримку енергосервісних контрактів. У 2026 році особливу роль

відіграє Фонд підтримки енергетики України. Загальна сума заявлених внесків до Фонду перевищила 2,13 млрд євро, з яких понад 2,07 млрд євро вже було внесено. Лише протягом 2026 року партнери спрямували до Фонду понад 300 млн євро.

Енергосервісний механізм залишається перспективним для реалізації заходів без значних початкових витрат замовника. Енергосервісна компанія фінансує модернізацію та повертає інвестиції за рахунок частини фактично досягнутої економії. Для України цей механізм особливо важливий у бюджетній сфері, житлово-комунальному господарстві та на підприємствах, які мають обмежений доступ до довгострокового капіталу.

Однак у воєнних умовах традиційна модель ЕСКО також потребує адаптації. Контракти повинні враховувати ризик пошкодження обладнання, тривалих перерв у роботі об’єкта, різких змін тарифів і скорочення споживання через зупинення виробництва. Доцільним є використання страхування воєнних ризиків, державних або міжнародних гарантій, а також комбінованого фінансування, яке поєднує грантові кошти, кредити та власний капітал підприємства.

Досвід інших держав показує, що результативна політика енергозбереження повинна працювати разом із ринковими механізмами. Вона не має зводитися лише до адміністративних заборон або встановлення формальних нормативів. Економічні стимули повинні робити енергоефективні рішення вигіднішими за продовження експлуатації застарілого обладнання[8,9].

Також держава має компенсувати характерні недоліки ринку. До них належать нестача інформації про економічний ефект енергозберігальних технологій, обмежений доступ підприємств до капіталу, тривалий строк окупності окремих проєктів та неврахування екологічних і безпекових переваг у ринковій ціні енергії.

З огляду на європейський курс України політика енергоефективності повинна узгоджуватися з цілями декарбонізації, розвитку відновлюваної енергетики та створення конкурентного енергетичного ринку. Водночас

механічне копіювання європейських підходів є недоцільним. Україна має враховувати воєнні ризики, необхідність швидкого відновлення, обмежені фінансові ресурси, значну частку енергоємної промисловості та критичну потребу у стійкому енергопостачанні.

Таким чином, станом на 2026 рік енергозбереження є не другорядним напрямом економічної політики, а одним із головних механізмів збереження промислового потенціалу України. Воно дозволяє скорочувати собівартість продукції, зменшувати імпорт енергоресурсів, підвищувати автономність підприємств, знижувати навантаження на пошкоджену енергетичну систему та забезпечувати виконання європейських екологічних вимог.

Подальша політика має ґрунтуватися на поєднанні обов’язкових стандартів, економічних стимулів, доступного фінансування, енергетичного аудиту, цифрового обліку та відповідальності за нераціональне використання ресурсів. Особливого значення набувають децентралізована генерація, накопичення енергії, когенерація, використання вторинного тепла, модернізація електроприводів та розвиток енергосервісу.

За умов воєнного стану кожна одиниця енергії, заощаджена без втрати обсягу і якості продукції, одночасно має економічну, соціальну й безпекову цінність. Саме тому підвищення енергоефективності повинно стати складовою не лише повоєнного відновлення, а й поточного функціонування промислових підприємств України.

1.2 Чинники зниження енергетичних витрат на промисловому підприємстві

Прокатне виробництво належить до найбільш енергоємних завершальних стадій металургійного циклу. Значні витрати енергетичних ресурсів тут пов’язані з нагріванням металевих заготовок, роботою головних

електроприводів прокатних станів, насосного, вентиляційного, компресорного і транспортного обладнання, а також із функціонуванням систем водопостачання, охолодження, освітлення та видалення окалини. Гаряча прокатка здійснюється за температури, яка зазвичай перевищує 1000 °С, тому навіть незначні відхилення технологічного режиму можуть спричиняти помітне збільшення витрат палива та електроенергії.

Для прокатного виробництва ПАТ «Запоріжсталь» питання енергозбереження набуває особливої актуальності через необхідність підтримувати стабільну роботу обладнання в умовах воєнного стану, нестабільного енергопостачання, дефіциту персоналу та змінних обсягів виробництва. У 2024 році підприємство експлуатувало три з чотирьох доменних печей і працювало приблизно на 75% довоєнної потужності. Одночасно комбінат продовжував випуск повного асортименту прокатної продукції.

Змінне завантаження виробничих потужностей безпосередньо впливає на питомі енерговитрати. При зниженні обсягів виробництва постійні витрати енергії на підтримання температурного режиму печей, роботу насосів, вентиляторів, систем освітлення та допоміжного обладнання розподіляються на меншу кількість готової продукції. Тому питомі витрати енергоресурсів на одну тонну прокату можуть зростати навіть тоді, коли загальне споживання енергії підприємством зменшується.

За таких умов найбільш доступним напрямом підвищення енергоефективності є впровадження режимних та організаційних заходів. На відміну від масштабної реконструкції обладнання, вони здебільшого не потребують значних капіталовкладень і можуть забезпечити економічний результат упродовж короткого періоду. До них належать оптимізація графіків роботи агрегатів, скорочення простоїв, удосконалення режимів нагрівання металу, контроль за завантаженням електродвигунів, усунення витоків енергоресурсів, підвищення якості технічного обслуговування та запровадження персональної відповідальності за перевитрати енергії.

Одним із головних чинників скорочення витрат палива є правильна організація роботи нагрівальних печей. Заготовка повинна бути нагріта до температури, достатньої для її пластичної деформації у прокатному стані. При цьому надмірне підвищення температури не покращує результат прокатування, але збільшує витрати палива, втрати металу з окалиною та навантаження на футерівку печі. Недостатнє нагрівання також є небажаним, оскільки воно збільшує опір деформації, навантаження на валки та потужність, яку споживають головні електроприводи.

Отже, температурний режим повинен визначатися з урахуванням марки сталі, геометричних розмірів заготовки, необхідної товщини готового прокату та фактичної продуктивності прокатного стану. Підтримання завищеної температури «із запасом» є одним із типових джерел непродуктивних витрат енергії. Навіть зниження середньої температури нагрівання на 10–20 °С за умови дотримання технологічних вимог може дати відчутний ефект при великих річних обсягах виробництва.

Важливе значення має рівномірність нагрівання металу. Якщо різні ділянки заготовки мають неоднакову температуру, частину металу доводиться перегрівати для забезпечення мінімально допустимої температури холодніших зон. Це збільшує загальну витрату палива та може спричиняти утворення дефектів прокату. Тому необхідно постійно контролювати роботу пальників, розподіл температури по зонах печі, тиск палива, співвідношення газу й повітря та стан вимірювальних приладів.

Оптимізація процесу горіння є одним із найбільш результативних режимних заходів. При недостатній подачі повітря відбувається неповне згоряння палива, а при його надлишку значна частина тепла втрачається з нагрітими димовими газами. Для підтримання оптимального коефіцієнта надлишку повітря доцільно використовувати безперервний контроль вмісту кисню в продуктах згоряння та автоматичне регулювання роботи пальників.

Удосконалення систем керування горінням, правильне регулювання пальників і попереднє нагрівання повітря можуть забезпечувати суттєву

економію. Наприклад, у промисловому проєкті модернізація рекуператора та підвищення температури повітря для горіння дозволяли скоротити енергоспоживання нагрівальної печі приблизно на 10%. Інший міжнародний приклад показує, що оптимізація умов нагрівання перед прокатуванням дала змогу зменшити витрати теплової енергії більш ніж на 10%.

Для умов ПАТ «Запоріжсталь» реалістичним первинним орієнтиром для комплексу маловитратних режимних заходів у нагрівальних печах можна вважати скорочення питомої витрати палива на 3–7%. У разі модернізації систем автоматичного регулювання, усунення підсмоктування холодного повітря та підвищення ефективності рекуперації потенціал може досягати 8–12%. Такі величини мають уточнюватися за результатами енергетичного аудиту та аналізу фактичних режимних карт конкретних печей.

Суттєве значення має завантаження нагрівальної печі. Найбільш економічною є робота агрегату при завантаженні, близькому до номінального. Якщо піч працює з низькою продуктивністю, зростає тривалість перебування металу в робочому просторі, а постійні теплові втрати через кладку, отвори і систему відведення газів розподіляються на меншу масу продукції. У результаті витрата палива на одну тонну прокату збільшується.

З організаційної точки зору необхідно формувати виробничі партії таким чином, щоб мінімізувати часті переходи між різними марками сталі, розмірами заготовок і температурними режимами. Часті переналагодження призводять до нерівномірної роботи печей, зниження продуктивності прокатного стану та збільшення тривалості простоїв. Формування більших однорідних партій може скорочувати кількість режимних переходів і забезпечувати стабільнішу роботу технологічної лінії.

Окремим резервом є скорочення часу між видачею металу з печі та початком прокатування. Під час очікування заготовка втрачає тепло в навколишнє середовище, тому для забезпечення необхідної температури прокатування її спочатку доводиться нагрівати до більш високого рівня. Затримки можуть виникати через несправність рольгангів, неузгодженість

роботи печі та прокатного стану, відсутність готовності допоміжного обладнання або несвоєчасне передавання виробничих завдань.

Тому важливим заходом є синхронізація роботи нагрівальних печей, рольгангів, клітей прокатного стану, ножиць, моталок і систем транспортування металу. Для цього доцільно використовувати єдину оперативну систему планування, яка враховує фактичну продуктивність усіх агрегатів і автоматично коригує темп видачі заготовок.

Особливе значення має скорочення гарячих простоїв. Під час такого простою метал залишається в печі, а паливо продовжує витрачатися на підтримання температури. Якщо зупинка прокатного стану триває довго, може виникнути потреба у зниженні температури печі, повторному розігріванні або навіть видаленні частини металу. Усі ці операції супроводжуються додатковими втратами енергії та продуктивності.

Зниження тривалості гарячих простоїв залежить від технічного стану обладнання й організації ремонтів. Планово-попереджувальне обслуговування має проводитися не лише відповідно до календарного графіка, а й з урахуванням фактичного стану вузлів. Контроль вібрації підшипників, температури електродвигунів, стану редукторів, валків і гідравлічних систем дозволяє виявляти дефекти до виникнення аварійної зупинки.

Умовний розрахунок показує масштаб можливого ефекту. Якщо скорочення простоїв дозволяє додатково прокатувати 20 т металу протягом однієї години, а піч у цей час споживає 800–1000 м³ природного або технологічного газу, то уникнення лише десяти годин таких простоїв дає можливість запобігти непродуктивному споживанню приблизно 8–10 тис. м³ газу. Фактичне значення залежатиме від типу печі, її продуктивності та теплотворної здатності використовуваного палива.

Істотним фактором є технічний стан футерівки та ущільнення робочого простору печі. Пошкодження теплоізоляції, нещільності в оглядових отворах і дверях, а також підсмоктування холодного повітря збільшують теплові втрати. У промислових системах нагрівання основні можливості підвищення

ефективності пов’язуються з оптимізацією горіння, утилізацією теплоти відхідних газів і зменшенням втрат через огородження та отвори.

Тому регулярне тепловізійне обстеження печей повинно стати частиною системи технічного обслуговування. Воно дає змогу виявляти ділянки з підвищеною температурою зовнішньої поверхні, пошкодження футерівки та нещільності. Своєчасне усунення таких дефектів може зменшувати теплові втрати на 2–5% без повної реконструкції агрегату.

Ще одним важливим напрямом є оптимізація роботи електроприводів. У прокатному виробництві потужні електродвигуни використовуються для обертання валків, переміщення металу, подачі води, роботи вентиляторів, насосів і компресорів. Значна частина допоміжних механізмів працює зі змінним навантаженням, тому їх експлуатація на постійній швидкості з регулюванням продуктивності засувками або дроселями є неефективною.

Для насосів, вентиляторів і димососів доцільно застосовувати частотне регулювання. IEA відносить модернізацію електродвигунних систем і використання частотно-регульованих приводів до ключових напрямів підвищення промислової енергоефективності, особливо для механізмів зі змінним навантаженням. На практиці економія електроенергії для окремого механізму може становити 15–30%, а при значному зниженні середнього навантаження — ще більше.

Водночас навіть без заміни електропривода можна отримати економію за рахунок правильного режиму роботи. Необхідно вимикати резервні насоси та вентилятори, які не потрібні за поточного обсягу виробництва, не допускати одночасної роботи надмірної кількості агрегатів і контролювати коефіцієнт їх завантаження. Робота великого електродвигуна на 20–30% номінального навантаження часто є менш ефективною, ніж використання меншого агрегату, підібраного відповідно до фактичної потреби.

У прокатному цеху значні обсяги електроенергії витрачаються на системи оборотного водопостачання та охолодження. Витрата води повинна відповідати реальній тепловій потужності обладнання. Надмірна подача не завжди

покращує охолодження, але збільшує споживання електроенергії насосами. Доцільним є секційне регулювання подачі води залежно від кількості працюючих агрегатів і температури в системі.

Ефективність насосної системи знижується через засмічення трубопроводів, зношення робочих коліс, закриті засувки, витоки та надмірний тиск. Зменшення гідравлічного опору мережі та підтримання оптимального тиску може скорочувати електроспоживання насосів на 5–15%. Для цього необхідно регулярно контролювати перепади тиску, очищувати фільтри та перевіряти відповідність фактичної робочої точки характеристикам насоса.

Значний резерв існує також у системі стисненого повітря. Його виробництво є енергоємним процесом, а витоки можуть тривалий час залишатися непоміченими. IEA зазначає, що навіть відносно просте коригування режимів завантаження компресорів може скоротити споживання енергії системою стисненого повітря більш ніж на третину.

На підприємстві доцільно проводити регулярні ультразвукові обстеження пневматичних мереж, маркувати виявлені витоки та контролювати їх усунення. Зниження робочого тиску лише на 0,1 МПа, якщо це допускається технологією, також може забезпечити кількавідсоткову економію електроенергії компресорів.

Організаційні заходи повинні спиратися на якісний енергетичний облік. Загальний лічильник на вході в цех не дозволяє визначити, який саме агрегат або технологічний режим спричинив перевитрати. Тому необхідно встановлювати окремі прилади обліку на нагрівальних печах, прокатних станах, насосних станціях, компресорах і великих вентиляційних установках.

Основним показником має бути не абсолютне споживання енергії, а її питома витрата на тонну придатного прокату. Такий показник необхідно розраховувати окремо для природного газу, електроенергії, води, стисненого повітря та пари. При цьому слід враховувати сортамент продукції, товщину прокату, марку сталі, кількість технологічних переходів і завантаження обладнання.

Для кожної зміни можна формувати енергетичний баланс, у якому відображаються обсяг випуску, тривалість простоїв, витрата палива, електроенергії та відхилення від установленої норми. Якщо фактична витрата перевищує нормативну, необхідно визначати причину: зміна сортаменту, несправність обладнання, порушення температурного режиму або недотримання виробничого графіка.

Перспективним напрямом є використання цифрових технологій та штучного інтелекту. На «Запоріжсталі» вже використовували алгоритми машинного навчання для прогнозування споживання газу, що сприяло зниженню енергетичних витрат. У 2024 році на підприємстві також було запроваджено систему штучного інтелекту для контролю якості продукції; точність пілотної моделі становила 75–85%.

Подальший розвиток таких систем може передбачати прогнозування температури заготовки, тривалості нагрівання, енергоспоживання і ймовірності простоїв. Алгоритм може аналізувати дані про марку сталі, розміри заготовки, температуру печі, швидкість прокатування та стан обладнання, після чого рекомендувати найбільш економічний режим роботи.

Важливим організаційним чинником залишається мотивація персоналу. Якщо працівники не отримують інформації про споживання енергії та не несуть відповідальності за відхилення, навіть сучасні системи автоматизації не забезпечать максимального результату. Доцільно встановлювати для цеху, дільниці та зміни конкретні показники енергоефективності й пов’язувати частину преміювання з їх виконанням.

Однак система мотивації не повинна стимулювати формальне зниження споживання за рахунок погіршення якості продукції або порушення технологічного режиму. Економія визнається обґрунтованою лише тоді, коли одночасно виконані вимоги щодо продуктивності, якості, безпеки й екологічних показників.

В умовах воєнного стану додатковим фактором є керування електричним навантаженням. За можливості енергоємні допоміжні операції доцільно

переносити на години меншого навантаження енергосистеми. Планування ремонтів, підготовка валків, перекачування води до резервуарів та інші гнучкі процеси можуть частково виконуватися у нічний час або в періоди відсутності системних обмежень.

Необхідно також визначити перелік критичних споживачів, які мають залишатися в роботі при аварійному обмеженні потужності. До них належать системи керування, охолодження, змащення, пожежної безпеки та обладнання, раптове вимкнення якого може призвести до аварії. Інші механізми повинні відключатися за заздалегідь розробленим алгоритмом.

Оцінити можливий сукупний ефект режимних та організаційних заходів можна лише після детального енергетичного обстеження. Проте для попереднього планування доцільно використовувати орієнтовні діапазони наведені в таблиці 1.2:

Таблиця 1.2 Заходи зниження енергії

Напрям заходів	Орієнтовне скорочення споживання відповідного ресурсу
Оптимізація температури й тривалості нагрівання	3–7% палива
Регулювання співвідношення палива та повітря	2–5% палива
Усунення нещільностей і ремонт футерівки	2–5% палива
Скорочення гарячих простоїв	3–8% питомих енерговитрат
Оптимізація виробничих партій і графіків	2–6% питомих енерговитрат
Оптимізація роботи насосів і вентиляторів	5–15% електроенергії відповідної системи
Частотне регулювання механізмів	15–30% електроенергії відповідного привода
Усунення витоків стисненого повітря	10–25% електроенергії компресорної системи
Оперативний облік і енергоменеджмент	3–7% загальних енерговитрат
Цифрове прогнозування та оптимізація режимів	2–5% загальних енерговитрат

Наведені показники не можна механічно підсумовувати, оскільки окремі заходи впливають на одні й ті самі складові енергоспоживання. Для прокатного

виробництва реалістичним сукупним результатом першого етапу режимно-організаційної програми можна вважати скорочення питомих енерговитрат приблизно на 7–12%. Після впровадження автоматизованого контролю, частотно-регульованих приводів і модернізації систем нагрівання потенціал може збільшитися до 15–20% [10].

Наприклад, якщо умовна річна витрата природного газу нагрівальними агрегатами становить 100 млн м³, скорочення споживання на 5% відповідатиме економії 5 млн м³ на рік. Якщо електроспоживання прокатного виробництва дорівнює 300 млн кВт·год, зниження його на 7% забезпечить економію близько 21 млн кВт·год. Ці розрахунки є ілюстративними та мають бути замінені фактичними даними енергетичного балансу цеху.

Масштаб виробництва «Запоріжсталі» підтверджує, що навіть невелике скорочення питомих витрат може забезпечити значний абсолютний результат. У 2023 році випуск сталі підприємством зріс на 65% і досяг 2,467 млн т, тоді як його річна проєктна потужність становить близько 4 млн т сталі. У 2026 році підприємство планує поставити до 180 тис. т гарячекатаного прокату новому трубному активу Metinvest у Румунії, причому понад 22 тис. т було відвантажено вже від початку року [11].

Це означає, що стабільність та енергоефективність прокатного виробництва мають значення не лише для внутрішньої роботи комбінату, а й для виконання експортних контрактів. Зниження витрат палива й електроенергії покращує конкурентоспроможність продукції, особливо в умовах зростання вимог європейських споживачів до вуглецевої інтенсивності металу.

Підприємство продовжує інвестувати в підтримання та оновлення прокатного обладнання. У 2023–2024 роках повідомлялося про модернізацію устаткування прокатних цехів «Запоріжсталі», а загальний обсяг інвестицій у модернізацію «Запоріжсталі» та «Каметсталі» за два роки становив 23 млрд грн. Це створює технічні передумови для подальшого впровадження автоматизованого енергетичного контролю та оптимізації режимів.

Таким чином, основний резерв зниження енергетичних витрат у прокатному виробництві полягає не тільки у встановленні нового обладнання, а й у підвищенні якості управління наявними технологічними системами. Узгодження роботи нагрівальних печей і прокатного стану, скорочення простоїв, оптимізація температури, контроль горіння, раціональне завантаження електроприводів та постійний енергетичний облік можуть забезпечити значний результат без зупинення виробництва на тривалу реконструкцію.

Для ПАТ «Запоріжсталь» у сучасних умовах найбільш доцільним є поетапний підхід. На першому етапі необхідно провести деталізований енергетичний аудит, установити базові показники питомого споживання та впровадити щозмінний контроль. На другому етапі слід оптимізувати режимні карти, графіки виробництва й технічного обслуговування. Третій етап повинен охоплювати автоматизацію, частотне регулювання, модернізацію пальникових систем і рекуперацію тепла.

Реалізація такого підходу дозволить зменшити собівартість гарячекатаного прокату, підвищити стійкість виробництва до перебоїв енергопостачання, скоротити викиди забруднювальних речовин і поліпшити конкурентні позиції підприємства. В умовах воєнного стану економія енергоресурсів стає не лише фінансовим результатом, а й важливою умовою збереження виробничого потенціалу металургійної промисловості Запоріжжя та України в цілому [12].

1.3 Опис об’єкта дослідження ПАТ «Запорізький металургійний комбінат “Запоріжсталь”

ПАТ «Запорізький металургійний комбінат “Запоріжсталь” є одним із найбільших підприємств гірничо-металургійного комплексу України та

традиційно посідає вагоме місце в структурі вітчизняної чорної металургії. Упродовж багатьох десятиліть комбінат відігравав важливу роль у забезпеченні промисловості листовим прокатом, чавуном, сталлю та іншими видами металопродукції. Завдяки масштабам виробництва, значній номенклатурі продукції та сформованому виробничому потенціалу підприємство часто називали однією з «перлин» української металургійної галузі.

Комбінат створювався як підприємство повного металургійного циклу. Його розміщення в Запоріжжі було зумовлене вигідним поєднанням сировинних, енергетичних і транспортних чинників. Для забезпечення виробництва використовувалися електроенергія Дніпровської гідроелектростанції, коксівне вугілля Донбасу та залізорудна сировина Криворізького басейну. Така територіальна організація дозволяла об’єднати в межах одного промислового комплексу основні стадії металургійного виробництва — від підготовки шихтових матеріалів до випуску готового листового прокату.

Будівництво підприємства розпочалося у 1930 році. Основною метою спорудження комбінату було забезпечення швидко зростаючих потреб промисловості у листовому металі. У той період активно розвивалися машинобудування, транспорт, будівництво та інші галузі, для яких листовий прокат був одним із головних конструкційних матеріалів. Саме тому створення великого металургійного підприємства в Запоріжжі мало стратегічне значення для індустріального розвитку країни.

Початком промислової історії комбінату вважають 16 листопада 1933 року, коли було отримано перший чавун. Ця дата закріпилася як день заснування підприємства. У 1935 році на комбінаті ввели в експлуатацію першу мартенівську піч, а у 1937 році розпочав роботу обтискний прокатний стан «Слябінг». У наступні роки виробнича структура підприємства поступово розширювалася: створювалися нові основні й допоміжні цехи, вводилися агрегати гарячої та холодної прокатки, удосконалювалися системи енергопостачання, транспортування і технічного обслуговування.

У традиційній структурі комбінату основними виробничими підрозділами були агломераційний, доменний, мартенівський, обтискний цехи, цех гарячої прокатки тонкого листа, а також цехи холодної прокатки № 1 і № 3. Кожний із цих підрозділів виконував окрему функцію в загальному технологічному ланцюгу. Послідовне поєднання агломераційного, доменного, сталеплавильного та прокатного виробництва дозволяло підприємству здійснювати повний цикл перероблення сировини в готову металопродукцію.

Крім основних виробничих цехів, комбінат мав розгалужену систему допоміжних і обслуговуючих підрозділів. До неї входили ремонтні цехи, підпорядковані службі головного механіка, енергетичні цехи під керівництвом головного енергетика, центральна заводська лабораторія, інженерні служби, цех підготовки виробництва, управління капітального будівництва, транспортні підрозділи, цех металоконструкцій та інші структурні одиниці. Така організація була необхідною для забезпечення безперервної роботи великого металургійного комплексу, де зупинення одного агрегату могло вплинути на весь технологічний процес.

Агломераційний цех є початковою ланкою металургійного виробництва. Його основним завданням є підготовка залізорудної сировини до подальшої плавки в доменних печах. У цеху виробляється офлюсований агломерат — спеціально підготовлений грудковий матеріал, що містить залізорудну сировину, паливо і флюси. Завдяки агломерації дрібні фракції руди перетворюються на міцний матеріал, придатний для доменного процесу.

Проєктна виробнича потужність агломераційного цеху становила приблизно 4,2 млн т агломерату на рік. У його складі діяли шість агломераційних машин, площа спікання кожної з яких становила 62,5 м². Технологічний комплекс цеху включав обладнання для приймання, дозування і змішування шихти, її зволоження, спікання, охолодження, дроблення та сортування готового агломерату. Після завершення підготовки агломерат транспортувався до доменного цеху.

Ефективність роботи агломераційного виробництва безпосередньо впливала на продуктивність доменних печей. Однорідність гранулометричного складу, міцність агломерату, вміст заліза і флюсів визначали газопроникність шихти, витрати коксу та стабільність доменної плавки. Тому контроль параметрів агломераційного процесу мав не лише технологічне, а й енергетичне значення.

Доменний цех призначений для виробництва переробного і ливарного чавуну. У доменних печах залізорудна сировина відновлюється за допомогою коксу при високій температурі, внаслідок чого утворюються рідкий чавун і доменний шлак. Проєктна потужність доменного цеху становила близько 2,3 млн т чавуну на рік.

Виплавка чавуну здійснювалася в п’яти доменних печах. Корисний об’єм більшості з них становив приблизно 1513–1525 м³, тоді як перша доменна піч мала менший об’єм — близько 960 м³. У печах виплавляли переробний чавун марок П1 і П2, ливарний чавун марок Л1–Л5, а також спеціальні марки чавуну, рафінованого магнієм.

Основна частина переробного чавуну використовувалася як сировина для виплавки сталі в мартенівському цеху. Водночас певна його частина могла розливатися на спеціальних розливних машинах у вигляді чушок різної маси та відправлятися зовнішнім споживачам. Ливарний чавун використовувався для виготовлення виливниць, піддонів та інших масивних деталей металургійного призначення.

Однією з характерних особливостей чавуну, що виплавлявся на комбінаті, був відносно низький вміст сірки та фосфору. Це позитивно впливало на його технологічні властивості та якість сталі, яка вироблялася з нього надалі. Завдяки цьому металопродукція підприємства мала попит не тільки на внутрішньому, а й на зовнішньому ринку.

Наступною стадією технологічного циклу було сталеплавильне виробництво. Історично воно було представлене мартенівським цехом, у складі

якого діяли дев’ять мартенівських печей місткістю від 280 до 500 т. Загальна проєктна потужність цеху становила приблизно 3,3 млн т сталі на рік.

Виплавка здійснювалася скрап-рудним способом, тобто із застосуванням рідкого чавуну, металевого брухту та залізорудних матеріалів. Як паливо використовувався природний газ, а для інтенсифікації процесу подавали кисень. Для покращення якості металу та вирівнювання його хімічного складу сталь могла додатково продуватися аргоном.

У мартенівському цеху виробляли маловуглецеві, конструкційні та леговані марки сталі. Після виплавки сталь розливалася у виливниці, де формувалися злитки масою до 20 т. Надалі вони передавалися до обтискного цеху для первинного прокатування.

Прокатне виробництво було завершальною та однією з найважливіших частин загального металургійного циклу. Саме тут сталеві злитки та сляби перетворювалися на листовий прокат, рулони й профілі, придатні для подальшого використання в машинобудуванні, будівництві та інших галузях.

До прокатного комплексу входили обтискний цех, цех гарячої прокатки тонкого листа, а також цехи холодного прокату № 1 і № 3. Загалом прокатне виробництво мало тринадцять прокатних станів, оздоблювальні агрегати для поздовжнього і поперечного різання металу та профілезгинальні установки.

Проєктна потужність прокатного комплексу становила приблизно 3 млн т прокату на рік. Крім того, підприємство мало можливість виробляти до 600 тис. т холодногнутих профілів. Такий обсяг виробництва зумовлював значне споживання електроенергії, природного газу, води, стисненого повітря та інших енергетичних ресурсів.

В обтискному цеху діяв стан «Слябінг-1150». На ньому сталеві злитки масою до 20 т прокатувалися у сляби. Для прокатування використовувалися вуглецеві, леговані та нержавіючі марки сталі. Отримані сляби мали товщину приблизно 100–200 мм, ширину 1000–1500 мм і довжину від 1800 до 4700 мм.

Особливістю роботи обтискного стану було те, що після прокатування сляби розрізалися на мірні довжини та значною мірою без проміжного

складування передавалися безпосередньо до цеху гарячої прокатки тонкого листа. Така схема отримала назву транзитної прокатки.

За транзитною схемою могло передаватися до 80% слябів. Це дозволяло використовувати залишкове тепло металу та скорочувати витрати палива на повторне нагрівання. Інші 10–20% продукції надходили на склад, на додаткову обробку або повторне нагрівання. Окремо могли перероблятися сляби з нержавіючої сталі, що надходили з інших підприємств, а також сляби, температура яких була нижчою за допустиму для подальшого прокатування.

Сляби з недостатньою температурою спрямовувалися до методичних печей цеху гарячої прокатки тонкого листа. Там вони повторно нагрівалися до температури, необхідної для забезпечення пластичності металу та стабільної роботи прокатного стану. З енергетичної точки зору така операція була досить витратною, тому збереження тепла слябів під час транспортування і скорочення часу очікування мали важливе значення.

Цех гарячої прокатки тонкого листа був одним із ключових підрозділів комбінату. Його основним обладнанням був широкосмуговий стан гарячої прокатки «1680». Крім головного прокатного стану, цех включав комплекс нагрівальних печей, рольгангів, ножиць, моталок, систем охолодження та транспортних механізмів.

Річна проєктна потужність цеху становила приблизно 3 млн т продукції. Основною продукцією був гарячекатаний лист і рулонний прокат. Листовий метал міг вироблятися довжиною до 5850 мм, шириною до 1500 мм і товщиною приблизно від 2 до 7 мм.

Технологічний процес у цеху починався з нагрівання слябів у методичних печах. Після досягнення необхідної температури метал подавався на прокатний стан, де послідовно проходив через систему клітей. У кожній кліті товщина смуги зменшувалася, а її довжина і швидкість руху збільшувалися.

Після завершення прокатування смуга охолоджувалася водою, змотувалася в рулон або розрізалася на листи необхідної довжини. Якість готового прокату залежала від точності підтримання температури, швидкості

прокатування, величини обтиснення та роботи систем автоматичного регулювання.

Енергетичне господарство цеху гарячої прокатки було складним і багатокомпонентним. Значні витрати природного газу припадали на нагрівальні печі, а основними споживачами електроенергії були головні електроприводи прокатного стану, насоси систем охолодження, вентилятори, рольганги, ножиці, моталки та допоміжні механізми.

Висока потужність електроприводів і значні теплові витрати зумовлювали необхідність постійного контролю питомого енергоспоживання. Особливе значення мали оптимізація температури нагрівання, скорочення гарячих простоїв, синхронізація роботи печей і прокатного стану, використання залишкового тепла слябів та зменшення втрат через футерівку і димові гази.

Після гарячої прокатки частина металу надходила до цехів холодного прокату. Холодна прокатка дозволяла отримувати лист і рулони меншої товщини, з вищою точністю геометричних параметрів і кращою якістю поверхні.

У цеху холодного прокату № 1 діяли десять прокатних станів та інше технологічне обладнання. Тут виробляли гарячекатані, травлені й холоднокатані рулони та листовий прокат із вуглецевих і маловуглецевих марок сталі.

До основних видів продукції цеху належали рулони з вуглецевих сталей товщиною приблизно 2,0–6,0 мм, шириною 900–1500 мм і масою 3–5 т. Крім того, випускалися травлені рулони з вуглецевих і маловуглецевих сталей товщиною 2,0–4,0 мм.

Окремим видом продукції був гарячекатаний травлений лист у пачках масою до 10 т. Його товщина становила близько 2,0–4,0 мм, а ширина — 1000–1500 мм. Травлення застосовувалося для видалення окалини, яка утворювалася на поверхні металу під час гарячої прокатки.

Подальші операції могли включати холодне прокатування, відпал, дресирування, різання та пакування. У результаті підвищувалася якість поверхні, точність товщини і механічні властивості готового металу.

Усі виробничі підрозділи комбінату були пов’язані єдиним технологічним і енергетичним потоком. Порушення роботи агломераційного або доменного виробництва впливало на сталеплавильний цех, а збої в роботі обтискного або прокатного стану могли спричиняти додаткові витрати палива через необхідність повторного нагрівання металу.

Саме тому енергоефективність підприємства залежала не лише від технічного стану окремого агрегату, а й від узгодженості роботи всього металургійного циклу. Зниження витрат енергії потребувало комплексного підходу, який охоплював підготовку сировини, виплавку чавуну і сталі, прокатування, транспортування та допоміжні системи.

Для прокатного виробництва найбільш значущими чинниками були температура металу, тривалість нагрівання, завантаження печей, кількість простоїв, стан футерівки, ефективність пальникових пристроїв і робота електроприводів. Навіть незначне відхилення цих параметрів могло призводити до зростання питомих витрат енергії на одну тонну продукції.

Таким чином, ПАТ «Запоріжсталь» сформувалося як складний промисловий комплекс повного металургійного циклу. Його виробнича структура охоплювала всі основні стадії перетворення залізорудної сировини на готовий листовий прокат. Особливе місце в цій системі посідало прокатне виробництво, оскільки саме на цій стадії формувалися геометричні параметри, якість поверхні та споживчі властивості кінцевої продукції.

Водночас прокатні цехи належали до найбільш енергоємних підрозділів комбінату. Тому дослідження їхнього енергоспоживання, виявлення непродуктивних витрат і розроблення режимних, організаційних та технічних заходів з енергозбереження є важливою умовою зниження собівартості продукції та підвищення ефективності роботи підприємства.

Технологічна схема виробництва цеху, рисунок 1.5.



Рисунок 1.3 – Технологічна схема виробництва цеху

1.4 Технологія виробництва та основне обладнання цеху гарячої прокатки тонкого листа

Технологічний процес промислового виробництва являє собою сукупність взаємопов’язаних операцій, у результаті виконання яких змінюються форма, геометричні розміри, структура, фізико-механічні властивості або стан вихідного матеріалу. У металургії технологічний процес охоплює не лише безпосередню деформацію металу, а й операції його підготовки, нагрівання, транспортування, охолодження, різання, правлення, контролю якості та подальшого складування.

Одним із найбільш поширених способів оброблення металів тиском є прокатування. Сутність цього процесу полягає у пропусканні металевої заготовки між обертовими валками, відстань між якими є меншою за початкову товщину металу. Під дією сил тертя заготовка захоплюється валками,

переміщується через міжвалковий проміжок і деформується. У результаті її товщина зменшується, довжина збільшується, а поперечний переріз набуває необхідної форми.

Для зниження опору деформації та зменшення навантаження на прокатне обладнання метал перед гарячим прокатуванням нагрівають до температури, що перевищує температуру рекристалізації. Для вуглецевих і низьколегованих сталей температура нагрівання слябів перед прокатуванням зазвичай перебуває в межах приблизно 1150–1250 °C. За таких умов метал набуває достатньої пластичності, а деформація відбувається без істотного зміцнення.

Прокатне виробництво є одним із найбільш продуктивних способів виготовлення металопродукції. Через прокатування проходить понад 80% сталі, що виплавляється у світі. Саме цим методом отримують листи, смуги, рулони, рейки, балки, швелери, кутики, круглі та квадратні профілі, труби, колеса, осі та інші види продукції.

У загальному металургійному циклі прокатне виробництво є третім переділом після виплавки чавуну та сталі. На цій стадії злитки, сляби, блюми або безперервнолиті заготовки перетворюються на готовий прокат. Якість прокатування визначає не лише геометричні розміри продукції, а й структуру металу, механічні властивості, стан поверхні та придатність до подальшої обробки.

За видом продукції прокат поділяють на сортовий, листовий, трубний і спеціальний. До сортового прокату належать квадратні та круглі профілі, кутики, швелери, двотаври, рейки й арматура. Листовий прокат виробляють у вигляді окремих листів або рулонів. До спеціального прокату належать залізничні колеса, осі, кулі, шпунтові профілі та інші вироби складної форми.

Прокатні стани відрізняються конструкцією, призначенням, кількістю клітей і характером руху металу. За призначенням виділяють обтискні, заготівельні, рейкобалкові, сортові, товстолистові, тонколистові та спеціальні стани. До обтискних належать блюмінги та слябінги, які призначені для первинного обтиснення великих злитків.

За характером руху металу стани поділяють на реверсивні, напівбезперервні та безперервні. На реверсивних станах заготовка багаторазово проходить через одну й ту саму кліть у протилежних напрямках. На безперервних станах метал послідовно проходить через декілька клітей, у кожній з яких відбувається задане зменшення товщини. Така схема забезпечує високу продуктивність, стабільність параметрів і можливість широкої автоматизації.

Окремим напрямом розвитку прокатного виробництва є так звана нескінченна прокатка. При цьому окремі заготовки зварюють у потоці встик, після чого смуга безперервно переміщується через прокатні кліті. Така технологія зменшує втрати металу на обрізання кінців, скорочує кількість перехідних режимів і підвищує рівномірність якості прокату.

Розрізняють гаряче та холодне прокатування. Гаряче прокатування здійснюється при температурі, вищій за температуру рекристалізації металу. Воно дозволяє отримувати значні ступені обтиснення при відносно невеликих зусиллях. Холодне прокатування, навпаки, здійснюється за температури, нижчої за температуру рекристалізації, найчастіше при температурі навколишнього середовища.

Перевагами холодного прокатування є можливість отримання тонких листів і смуг, висока точність геометричних розмірів, краща якість поверхні та підвищені механічні характеристики. Саме холодним способом виготовляють прокат товщиною менше 0,8–1,0 мм, а в окремих випадках — смуги товщиною в декілька десятків мікрометрів.

Водночас холодне прокатування потребує більших деформувальних зусиль і значних витрат електроенергії. Під час холодної деформації метал зміцнюється, його пластичність знижується, тому між окремими стадіями прокатування або після завершення процесу виконується рекристалізаційний відпал. Таким чином, холодне прокатування зазвичай включає не лише механічну деформацію, а й травлення, відпал, дресирування, різання та інші операції.

Гаряче прокатування характеризується високими витратами палива на нагрівання металу, тоді як холодне прокатування потребує значних витрат електричної енергії на привод прокатних клітей і теплової енергії на відпал. Тому порівнювати енергоємність цих процесів необхідно з урахуванням повного технологічного циклу.

До основних переваг прокатного виробництва належать висока продуктивність, широкий асортимент продукції, можливість механізації та автоматизації, безперервність виробництва й відносно низькі питомі витрати праці. Сучасні прокатні стани можуть працювати зі швидкістю руху смуги в декілька метрів за секунду, а на окремих чистових ділянках швидкість досягає 10–20 м/с.

Разом із тим прокатне виробництво є капіталомістким і енергоємним. Для його організації необхідні потужні електроприводи, масивні кліті, нагрівальні печі, системи водяного охолодження, рольганги, ножиці, моталки та комплекс допоміжного обладнання. Додаткові витрати пов’язані з підготовкою валків, ремонтом підшипникових вузлів, очищенням води від окалини й мастильних матеріалів.

Технологічний процес сучасного прокатного виробництва зазвичай складається з підготовки вихідного матеріалу, його нагрівання, видалення окалини, чорнового та чистового прокатування, контрольованого охолодження, різання або змотування в рулони, правлення, контролю якості та пакування. На кожній стадії здійснюється контроль параметрів металу й технічного стану обладнання.

Цех гарячої прокатки тонкого листа ПАТ «Запоріжсталь» призначений для виробництва гарячекатаного листового та рулонного прокату з вуглецевих, низьколегованих, легованих і окремих марок нержавіючої сталі. Готова продукція використовується як товарний прокат або як підкат для подальшого холодного прокатування, травлення, нанесення покриттів і виробництва гнутих профілів.

Основним агрегатом цеху є широкосмуговий тонколистовий стан гарячої прокатки «1680». Число 1680 у його назві приблизно відповідає довжині бочки робочих валків і характеризує максимально можливу ширину прокатуваної смуги. Фактична ширина готового прокату, залежно від сортаменту, становить орієнтовно 1000–1530 мм.

Вихідним матеріалом для гарячого прокатування є сляби. Їх маса перебуває приблизно в межах від 1,7 до 8,5 т, довжина — від 2100 до 4700 мм, товщина — від 105 до 170 мм. Після багаторазового обтиснення на стані отримують смугу товщиною приблизно 2–6 мм.

Частина слябів може надходити до цеху в гарячому стані безпосередньо після прокатування на слябінгу. Використання залишкового тепла металу дозволяє скоротити витрати палива на повторне нагрівання. Сляби, температура яких нижча за технологічно допустиму, направляються в методичні печі.

До складу цеху входять ділянки нагрівання металу, чорнового і чистового прокатування, транспортування, охолодження, змотування, різання та оздоблення прокату. Окремо функціонує ділянка підготовки валків, а також системи водопостачання, мастилозабезпечення, вентиляції, електропостачання та очищення стічних вод.

Перед прокатуванням сляби нагріваються у методичних печах № 1–5. Печі мають декілька температурних зон, двосторонній нагрів, торцеве завантаження і видачу металу. Така конструкція забезпечує поступове нагрівання сляба та вирівнювання температури по його перерізу.

У нагрівальних печах використовують суміш доменного, коксового та природного газів. Нижча теплота згоряння такої суміші становить орієнтовно 1070–1260 ккал/м³, що відповідає приблизно 4,5–5,3 МДж/м³. Конкретна калорійність залежить від співвідношення компонентів газової суміші.

Для забезпечення необхідної пластичності металу температура сляба перед видачею з печі повинна становити приблизно 1150–1250 °С. Надмірне нагрівання призводить до перевитрати палива, збільшення угару металу та

утворення значної кількості окалини. Недостатній нагрів збільшує навантаження на електроприводи прокатних клітей і може погіршувати якість готової продукції.

Після видачі з печі сляб транспортується до стану системою рольгангів. Перед початком деформації з його поверхні видаляється пічна окалина за допомогою гідрозбивання водою високого тиску. Це необхідно для попередження втискування окалини в поверхню металу й утворення дефектів.

Стан «1680» складається з чорнової та чистової груп клітей. У чорновій групі відбувається основне зменшення товщини сляба та формування проміжного підкату. Чистова група забезпечує отримання необхідної кінцевої товщини, ширини, температури й профілю смуги.

До чорнової групи входить одна двовалкова кліть. Діаметр її робочих валків становить приблизно 810–900 мм, а довжина бочки — 1680 мм. Привод кліті здійснюється електродвигуном потужністю близько 1840 кВт.

Крім того, чорнова група містить чотири чотиривалкові кліті № 1–4. Кліть № 1 має привод потужністю близько 5400 кВт, а кліті № 2–4 — приблизно по 3700 кВт кожна. Робочі валки різних клітей мають діаметр орієнтовно від 580 до 980 мм.

Чотиривалкова кліть складається з двох робочих і двох опорних валків. Робочі валки безпосередньо контактують із металом, а опорні запобігають їх надмірному прогину. Така конструкція дозволяє прокатувати тоншу смугу з кращою точністю товщини та поперечного профілю.

У чорновій групі також використовуються три вертикальні кліті. Вони призначені для обтиснення бокових кромок, регулювання ширини смуги та запобігання надмірному поперечному розширенню металу. Діаметр вертикальних валків становить приблизно 570–810 мм, а потужність окремих приводів — близько 200 кВт.

Після чорнового прокатування метал надходить до чистової групи. Перед входом у неї встановлена двовалкова кліть із приводом потужністю близько 365 кВт і робочими валками діаметром приблизно 580–620 мм.

Основну частину чистової групи утворюють шість чотиривалкових клітей. Потужність приводних електродвигунів кожної з них становить приблизно 4000–5000 кВт. Отже, лише сумарна встановлена потужність головних приводів чистових клітей може досягати 24–30 МВт.

Прокатування від початкової товщини сляба до кінцевої товщини смуги здійснюється за декілька проходів і послідовних обтиснень. У кожній кліті встановлюється певний міжвалковий зазор, швидкість обертання валків і величина натягу смуги.

У міру зменшення товщини металу його довжина та швидкість руху збільшуються. Тому швидкість обертання валків кожної наступної чистової кліті повинна бути більшою, ніж попередньої. Порушення цього співвідношення може призвести до надмірного натягу, утворення петлі, розриву смуги або погіршення її геометричних параметрів.

Між окремими клітями встановлюються петлерегулювальні пристрої. Вони підтримують заданий натяг смуги та компенсують невеликі відмінності швидкості роботи сусідніх клітей. Система автоматичного керування регулює швидкість приводів, положення валків і натяг у режимі реального часу.

Перед чистовою групою або між її окремими ділянками можуть застосовуватися летючі ножиці. Кінцеві ножиці важільного типу з умовним позначенням 25×1700 мм призначені для обрізання переднього і заднього кінців смуги. Потужність їхнього приводного двигуна становить близько 300 кВт.

Обрізання переднього кінця дозволяє видалити нерівну частину підкату та забезпечити стабільне захоплення металу наступними клітями. Задній кінець також може мати неправильну форму, тому його видалення підвищує вихід придатної продукції та зменшує ризик аварійних режимів.

Транспортування металу між печами, клітями, ножицями та моталками здійснюється системою рольгангів. Пічний рольганг складається приблизно з 94 роликів діаметром 400 мм із довжиною бочки близько 1700 мм.

Перед двовалковою кліттю встановлено близько семи роликів діаметром 350 мм і довжиною бочки до 2400 мм. На ділянках перед чорновими клітями

кількість роликів становить від 6 до 17 одиниць залежно від довжини конкретної ділянки.

Проміжний рольганг включає приблизно 41 ролик діаметром близько 300 мм. На ділянці від останньої чистової кліті до першої моталки використовується до 186 роликів. На наступній транспортній ділянці кількість роликів може перевищувати 200 одиниць.

Таким чином, загальна кількість роликів у технологічній лінії стану становить декілька сотень. Кожен ролик або група роликів обладнані приводом, підшипниками та системою охолодження. Через це рольганги є помітними споживачами електроенергії та потребують постійного технічного обслуговування.

Після виходу з останньої чистової кліті гаряча смуга надходить на відвідний рольганг. Тут здійснюється її контрольоване охолодження водою. Інтенсивність охолодження визначається маркою сталі, товщиною смуги та необхідними механічними властивостями.

Температура завершення прокатування може перебувати приблизно в межах 800–900 °C, а температура змотування — близько 500–700 °C. Точні значення встановлюються технологічними інструкціями для кожної марки сталі.

Після охолодження смуга змотується в рулон. Моталки повинні забезпечувати щільне намотування без телескопічності, зміщення витків і пошкодження кромок. Маса готового рулону залежить від довжини смуги й може становити декілька тонн.

Частина гарячекатаного прокату направляється на подальше оброблення. Він може розрізатися на листи, надходити на травлення, холодне прокатування, термічну обробку або виготовлення гнутих профілів.

До допоміжного обладнання цеху належать правильні машини, моталки, ножиці, обробні й мийні агрегати, системи гідрозбивання окалини, обладнання для підготовки валків і транспортні механізми. Для правлення листа може використовуватися 13-роликова правильна машина.

Правлення необхідне для усунення хвилястості, короблення та інших відхилень від площинності. Метал послідовно згинається в протилежних напрямках між системою роликів, унаслідок чого залишкові напруження частково вирівнюються.

Важливим підрозділом є ділянка підготовки валків. До її складу входять два верстати для обдирання, два шліфувальні верстати, машина для насічення поверхні валків, майданчики для огляду подушок і підшипників, а також стелажі для складання та розбирання валкових комплектів.

Стан поверхні валків безпосередньо впливає на якість готового прокату. Зношування, тріщини, подряпини та нерівномірність діаметра можуть переноситися на поверхню смуги й спричиняти відхилення її товщини. Тому валки регулярно оглядаються, шліфуються та замінюються.

Робота стану потребує значних обсягів води. Вода використовується для охолодження валків, рольгангів, підшипників, моталок, нагрівальних печей, електродвигунів і мастильної системи. Окремі значні витрати пов’язані з гідрозбиванням окалини та контрольованим охолодженням смуги.

Водопостачання та водовідведення організовані за оборотно-прямоточною схемою. У цеху використовується питна вода, свіжа технічна вода, умовно чиста оборотна вода, оборотна вода забрудненого циклу та вода повторного використання.

Свіжа технічна вода подається на найбільш відповідальні споживачі, зокрема повітроохолоджувачі, методичні печі, охолодження валків і системи гідрозбивання окалини. Умовно чиста оборотна вода використовується для охолодження рольгангів, моталок та іншого обладнання.

Вода забрудненого циклу застосовується переважно в системах гідрозмивання і транспортування окалини. Після контакту з гарячим металом та обладнанням вона містить частинки окалини й мастильні матеріали, тому перед повторним використанням проходить очищення.

Вода після охолодження смуги може повторно використовуватися на моталках, мийних агрегатах і в системі гідрозмивання. Такий підхід зменшує споживання свіжої технічної води та навантаження на систему водовідведення.

Стічні води від чорнової та чистової груп стану спочатку надходять у первинні відстійники. Вміст окалини в них може досягати приблизно 300 мг/л, а мастильних матеріалів — до 40 мг/л.

Далі забруднена вода насосами типу ГрТ 1600/50 подається двома шламопроводами діаметром близько 1100 мм до горизонтальних відстійників. У них тверді частинки осідають, а мастильні матеріали затримуються на поверхні.

Освітлена вода переливається через спеціальні гребені та надходить до камери гарячої води місткістю приблизно 600 м³. Звідти циркуляційні насоси типу Д5400/30 подають її на дві двосекційні вентиляторні градирні.

У градирнях вода охолоджується за рахунок контакту з повітрям. Для інтенсифікації процесу використовуються вентилятори типу ВГ-70. Після охолодження вода надходить у камеру холодної води місткістю близько 1000 м³.

Із камери холодної води насосами продуктивністю близько 5000 м³/год і напором до 50 м вода двома трубопроводами діаметром близько 1100 мм повертається до цеху. Таким чином формується замкнений оборотний цикл.

Осіла в горизонтальних відстійниках окалина зневоднюється та вивозиться на рудний двір. Оскільки окалина містить значну кількість заліза, її можна частково повертати до металургійного виробництва як вторинну сировину.

З енергетичної точки зору найбільшими споживачами в цеху є методичні печі, головні електроприводи клітей, насосні станції, системи охолодження, рольганги, димососи та вентилятори. Сумарна потужність лише основних приводів прокатних клітей становить декілька десятків мегават.

Витрати палива в методичних печах залежать від температури посадки сляба, продуктивності стану, тривалості нагрівання, стану футерівки та

ефективності рекуператорів. При переході від холодної посадки слябів до гарячої витрати палива можуть помітно скорочуватися.

Важливе значення має синхронізація роботи печей і прокатного стану. Якщо стан зупиняється, нагріті сляби залишаються в печі, а паливо витрачається лише на підтримання їх температури та компенсацію теплових втрат. Тому скорочення простоїв безпосередньо знижує питомі енерговитрати.

Основними контрольованими параметрами технологічного процесу є температура сляба на виході з печі, температура початку та завершення прокатування, товщина смуги після кожної кліті, швидкість валків, натяг між клітями, ширина смуги, температура змотування та витрата охолоджувальної води.

Для підтримання цих параметрів застосовуються автоматизовані системи керування. Вони отримують інформацію від пірометрів, товщиномірів, датчиків швидкості, тиску, температури, струму та положення натискних механізмів.

Таким чином, технологія виробництва гарячекатаного тонкого листа є складним безперервним процесом, у якому взаємодіють теплові, механічні, електричні й гідравлічні системи. Початковий сляб товщиною до 170 мм у процесі нагрівання та послідовного обтиснення перетворюється на смугу товщиною приблизно 2–6 мм.

Загальне зменшення товщини при цьому може перевищувати 95%. Наприклад, при прокатуванні сляба товщиною 150 мм у смугу товщиною 3 мм сумарний ступінь обтиснення становитиме $\varepsilon = 150 - 3150 \cdot 100\% = 98\%$.

Таке значне деформування здійснюється не за один прохід, а послідовно розподіляється між чорновими та чистовими клітями. Це дозволяє підтримувати допустимі навантаження на валки, електроприводи й конструкції стану.

Отже, цех гарячої прокатки тонкого листа є одним із найбільш технічно складних та енергоємних підрозділів металургійного комбінату. Ефективність його роботи визначається не лише продуктивністю прокатного стану, а й

узгодженістю роботи нагрівальних печей, рольгангів, клітей, систем охолодження, моталок та водооборотного циклу.

Підвищення енергоефективності ЦГПТЛ можливе завдяки збільшенню частки гарячої посадки слябів, оптимізації температурного режиму печей, скороченню простоїв, регулюванню роботи насосів і вентиляторів, підвищенню ефективності охолодження та впровадженню автоматизованого контролю питомих витрат енергії.

1.5 Аналіз енергоспоживання ЦГПТЛ

Ефективність використання паливно-енергетичних ресурсів є одним із ключових показників результативності промислового підприємства. Для металургійних комбінатів, технологічні процеси яких характеризуються значною енергоємністю, скорочення питомого споживання палива, електричної та теплової енергії має не лише економічне, а й стратегічне значення. Витрати на енергоресурси безпосередньо впливають на собівартість металопродукції, її конкурентоспроможність, стабільність виробничого процесу та можливість підприємства працювати за умов коливання цін на природний газ і електроенергію.

На металургійних підприємствах повного циклу енергетичні ресурси використовуються на всіх стадіях виробництва: підготовці сировини, виплавленні чавуну і сталі, нагріванні металу, його прокатуванні, термічному обробленні, травленні, охолодженні та транспортуванні. Значну частину енергії також споживають допоміжні системи — насосні та компресорні станції, вентиляція, системи водопостачання, освітлення, газоочисне обладнання і внутрішньозаводський транспорт.

У прокатних цехах металургійних комбінатів повного циклу частка споживання первинних енергетичних ресурсів може досягати приблизно 20%

від їх загального використання підприємством. Частка прокатного виробництва у структурі електроспоживання зазвичай є дещо нижчою, однак також залишається значною. Як приклад, на металургійному підприємстві повного циклу сортового напряму електроенергія може розподілятися таким чином: доменне виробництво — близько 4%, коксохімічне — 9%, сталеплавильне — 5%, прокатне — 16%, енергетичне господарство — 47%, механічні, ремонтні та інші підрозділи — близько 6%. Конкретне співвідношення залежить від технологічної схеми підприємства, рівня завантаження обладнання, сортаменту продукції та ступеня використання власних вторинних енергоресурсів.

Кінцевим результатом реалізації заходів з енергозбереження є скорочення витрат на придбання паливно-енергетичних ресурсів і зменшення їх частки у загальній собівартості продукції. За змінних обсягів виробництва об’єктивнішим показником є не абсолютне споживання енергії, а її питомі витрати на одиницю продукції, наприклад кубічних метрів природного газу або кіловат-годин електроенергії на одну тонну прокату.

Зниження енергоспоживання може забезпечуватися технічними, технологічними, режимними та організаційними методами. До технічних заходів належать модернізація електроприводів, заміна застарілих двигунів, підвищення ефективності печей, теплоізоляції та систем утилізації теплоти. Технологічні заходи передбачають удосконалення режимів нагрівання, прокатування, термічного оброблення й охолодження металу. Режимні заходи полягають у виборі раціонального навантаження обладнання, скороченні холостого ходу та обмеженні піків електричної потужності. Організаційні заходи охоплюють оптимізацію виробничого графіка, скорочення простоїв, підвищення якості обліку енергії та відповідальності персоналу за її використання.

ПАТ «Запоріжсталь» є одним із найбільших металургійних підприємств України та спеціалізується на виробництві чавуну, сталі, гарячекатаного і холоднокатаного листового прокату, продукції з вуглецевих, низьколегованих і легованих сталей, гнутих профілів, жерсті та інших видів металопродукції.

Значна частина продукції використовується підприємствами машинобудування, будівельної, трубної та харчової промисловості.

Висока енергоємність металургійного виробництва зумовлює необхідність систематичного контролю споживання природного газу, електроенергії, пари, стисненого повітря та технологічних газів. У межах реалізації загальної технологічної стратегії Групи «Метінвест» підприємство здійснює модернізацію обладнання, удосконалює системи обліку та впроваджує енергозберігальні заходи. Проте для обґрунтування конкретних напрямів підвищення енергоефективності необхідно визначити структуру споживання ресурсів безпосередньо у досліджуваному цеху.

Основними енергетичними ресурсами, які використовуються під час виробництва прокату в ЦГПТЛ, є природний газ, електрична енергія, пара, стиснене повітря та захисний газ. До допоміжних ресурсів належать технічна і питна вода, азот, водень, кисень та інші технологічні середовища. Кожен вид ресурсу виконує окрему функцію: природний газ використовується для нагрівання та термічного оброблення металу, електроенергія — для живлення прокатних станів і допоміжних механізмів, пара — у технологічних і опалювальних системах, стиснене повітря — у приводах, системах автоматики та очищення, а захисний газ — для запобігання окисненню металу під час термічного оброблення.

Для аналізу прийнято вихідні виробничі дані за 2026 рік. За цей період обсяг виготовленого прокату різного сортаменту становив 466 606 т. Річне споживання і вартість основних енергоресурсів наведено в таблиці 1.3.

Таблиця 1.3 – Річне споживання енергетичних ресурсів ЦГПТЛ

Енергоресурс	Обсяг споживання	Вартість, грн
Природний газ, м³	92 821 931,5	592 445 260,5
Електроенергія, кВт·год	392 289 662,4	474 278 201,8
Пара, ккал	242 065 860,7	408 026 214,8
Стиснене повітря, м³	411 607 150,8	69 067 679,9
Захисний газ, м³	52 633 156,8	107 371 639,9
Інші ресурси	—	87 497 957,1
Разом	—	1 738 686 954,0

Загальна вартість спожитих енергетичних ресурсів за розглянутий період становила близько 1,739 млрд грн у цінах відповідного року. У структурі витрат найбільша частка припадала на природний газ — приблизно 34,1%. Витрати на електричну енергію становили близько 27,3%, на пару — 23,5%, на захисний газ — 6,2%, на інші ресурси — приблизно 5,0%, а на стиснене повітря — близько 4,0%.

Отже, сукупна частка природного газу, електричної енергії та пари перевищувала 84% усіх енергетичних витрат цеху. Саме ці ресурси мають першочергове значення під час розроблення заходів з енергозбереження.

За обсягу виробництва 466 606 т орієнтовні питомі показники становили:

природний газ — близько 198,9 м³/т прокату;

електроенергія — близько 840,7 кВт·год/т;

стиснене повітря — близько 882,1 м³/т;

захисний газ — близько 112,8 м³/т;

загальна вартість енергоресурсів — приблизно 3726 грн/т прокату у цінах 2026 року.

Наведені питомі значення дають можливість порівнювати ефективність роботи цеху в різні періоди незалежно від зміни обсягів виробництва. Наприклад, зменшення абсолютного споживання електроенергії за одночасного суттєвого скорочення виробництва не завжди свідчить про підвищення енергоефективності. Об’єктивним результатом є зниження кількості енергії, витраченої на виробництво однієї тонни придатної продукції.

Аналіз структури витрат показує, що найбільше економічне навантаження створюють природний газ та електрична енергія. Значна частка природного газу пов’язана з роботою термічних печей, у яких здійснюється нагрівання і відпал рулонного металу. Електроспоживання формується насамперед головними приводами прокатних станів, роликовими машинами, моталками, вентиляторами, насосами, травильними агрегатами та іншими допоміжними механізмами.

Для визначення основних центрів електричного навантаження розглянемо структуру споживання електроенергії окремими групами обладнання.

Таблиця 1.4 – Споживання електроенергії обладнанням цеху

№	Вид навантаження	Установлена потужність, кВт	Споживання, кВт·год/рік	Частка, %
1	Прокатний стан	12 121,5	106 184 278,5	33,5
2	Пічне обладнання	4 373,8	38 314 759,5	12,1
3	Роликова правильна машина	3 030,4	26 546 069,6	8,4
4	Моталка №1	1 134,7	9 940 276,4	3,1
5	Моталка №2	1 686,9	14 777 379,7	4,7
6	Обробні агрегати	1 343,5	11 768 689,9	3,7
8	Травильні агрегати	2 582,6	22 623 173,0	7,1
9	Інші агрегати	3 821,7	33 477 656,1	10,5
10	Вентиляція і кондиціювання	2 390,0	20 936 400,0	6,6
11	Зовнішнє освітлення	410,0	3 591 600,0	1,1
12	Внутрішнє освітлення	649,0	5 685 240,0	1,8
13	Разом за вихідними даними	36 230,9	317 382 902,4	100,0

Основним споживачем електроенергії є прокатний стан, на який припадає близько третини загального електроспоживання цеху. Це пояснюється значною потужністю головних електроприводів, високими моментами прокатування та циклічним характером навантаження. У момент захоплення металу валками струм електродвигунів різко зростає, після чого навантаження змінюється залежно від величини обтиснення, температури, товщини та механічних властивостей металу.

Пічне обладнання формує близько 12,1% електроспоживання. Незважаючи на використання природного газу як основного джерела теплоти, електроенергія необхідна для роботи вентиляторів, димососів, систем циркуляції захисного газу, приводів механізмів, контрольно-вимірювальних приладів і систем автоматизації.

Роликова правильна машина споживає близько 8,4% електроенергії, травильні агрегати — 7,1%, а системи вентиляції та кондиціювання — 6,6%. Сукупна частка моталок становить приблизно 7,8%. Отже, значний потенціал енергозбереження пов’язаний не тільки з головними приводами прокатних станів, а й з допоміжним обладнанням, яке нерідко працює без належного узгодження з фактичним виробничим навантаженням.

Структуру споживання природного газу основними видами пічного обладнання наведено в таблиці 1.5.

Таблиця 1.5 – Споживання природного газу обладнанням цеху

Найменування обладнання	Споживання, м³/рік	Частка, %
Ковпакові печі	80 755 080,5	87,0
Печі EBNER	12 066 851,1	13,0
Разом	92 821 931,6	100,0

Аналіз показує, що основними споживачами природного газу є ковпакові печі, на які припадає близько 87% його загальної витрати. Частка висококонвективних печей EBNER становить приблизно 13%. Тому найбільший потенціал скорочення газоспоживання пов’язаний із підвищенням ефективності ковпакового відпалу, оптимізацією температурно-часових режимів, поліпшенням теплоізоляції та зменшенням втрат теплоти з димовими газами.

Особливості роботи ковпакових печей. Термічне оброблення рулонів здійснюється для формування необхідної структури та механічних властивостей металу. Під час прокатування відбувається пластична деформація сталі, унаслідок якої збільшується її міцність і твердість, однак знижується пластичність. Таке явище називають наклепом. Для усунення його негативного впливу метал піддається рекристалізаційному відпалу.

У процесі відпалу сталь нагрівається до температури, за якої відновлюється її зерниста структура, зменшуються внутрішні напруження та забезпечуються необхідні пластичні властивості. Це особливо важливо для

металу, що надалі використовується для глибокого штампування, вигинання та формування складних деталей.

Проліт термічного відділення має довжину близько 900 м. У ньому розташовано 16 блоків ковпакових печей. Блоки №2–5, №7–11 і №17–19 містять по 15 стендів. Блок №6 включає 12 стендів, блоки №15 і №16 — по 21 стенду, а блок №14 — 18 стендів висококонвективних печей EBNER.

Загальна кількість стаціонарних стендів становить 234 одиниці. До комплекту кожного блока входять стенди, нагрівальні ковпаки, муфелі та конвекторні кільця. Зокрема:

блоки №2–5, №7–11 і №17–19 мають по 15 стендів, п’ять нагрівальних ковпаків та 15 муфелів;

блок №6 містить 12 стендів, чотири нагрівальні ковпаки та 12 муфелів;

блоки №15 і №16 мають по 21 стенду, сім нагрівальних ковпаків і по 21 муфелю;

блок №14 обладнано 18 стендами висококонвективних печей EBNER.

На один стенд установлюють, як правило, до п’яти рулонів холоднокатаного листа. Після формування садки рулони накривають муфелем, між стендом і муфелем створюють піщаний затвор, після чого встановлюють нагрівальний ковпак.

Піщаний затвор забезпечує герметичність підмуфельного простору та запобігає проникненню атмосферного повітря. Це має важливе значення, оскільки потрапляння кисню під муфель може спричинити окиснення поверхні металу, погіршення її якості та збільшення частки браку.

Нагрівання здійснюється внаслідок спалювання природного газу у восьми пальниках, установлених у нижній частині ковпака. Гарячі продукти згоряння рухаються вздовж зовнішньої поверхні муфеля та передають йому теплоту. Від нагрітого муфеля тепло передається захисному газу, який циркулює між рулонами та забезпечує їх поступове і рівномірне нагрівання.

Муфель виконує дві основні функції: герметизує садку та захищає метал від безпосереднього контакту з продуктами згоряння природного газу. Якість

муфеля, відсутність тріщин і герметичність з’єднань безпосередньо впливають на стабільність атмосфери та енергоефективність процесу.

Для запобігання окисненню металу, інтенсифікації теплообміну під час нагрівання та відведення теплоти в процесі охолодження під муфель протягом усього технологічного циклу подається конвертований захисний газ. Його орієнтовний склад є таким:

водень H_2 — 4–5,2%;

монооксид вуглецю CO — не більше 0,1%;

діоксид вуглецю CO_2 — не більше 0,1%;

кисень O_2 — не більше 0,001%;

решта — азот.

Водень, що входить до складу атмосфери, має підвищену теплопровідність і сприяє інтенсифікації теплообміну. Водночас його концентрація повинна постійно контролюватися з огляду на вимоги вибухо- та пожежобезпеки.

Нагрівальний ковпак являє собою металевий кожух циліндричної форми, внутрішня поверхня якого футерована вогнетривкою шамотною цеглою. Футерування зменшує втрати теплоти в навколишнє середовище та захищає металевий корпус від впливу високої температури. У нижній частині ковпака розташований пальниковий пояс із тангенціально встановленими інжекційними пальниками. Таке розміщення сприяє закручуванню потоку продуктів згоряння та рівномірнішому нагріванню поверхні муфеля.

Максимальна витрата природного газу на один нагрівальний ковпак становить приблизно 62–68 м³/год, а на один пальник — до 8,4 м³/год. Максимальна витрата повітря для двох ежекторів досягає близько 400 м³/год. Теплотворна здатність природного газу прийнята на рівні приблизно 8250 ккал/м³. Маса одного нагрівального ковпака становить близько 10 т.

Основні джерела енергетичних втрат. Під час експлуатації ковпакових печей додаткові витрати природного газу можуть бути спричинені:

зношенням або пошкодженням футерування нагрівального ковпака;

порушенням герметичності муфеля і піщаного затвора;

неоптимальним співвідношенням газу та повітря;

нерівномірним розміщенням рулонів на стенді;

неповним завантаженням садки;

завищеною тривалістю витримки;

надмірною температурою відхідних газів;

несвоєчасним перемиканням технологічних режимів;

недостатнім контролем температури металу;

повторним нагріванням через порушення виробничого графіка.

Зниження газоспоживання може бути досягнуте шляхом автоматичного регулювання співвідношення «газ–повітря», контролю вмісту кисню у димових газах, відновлення футерування, скорочення тривалості простоїв нагрітих печей, оптимального комплектування садок та використання теплоти відхідних газів для попереднього нагрівання повітря.

Для електричного обладнання основними напрямами енергозбереження є застосування частотно-регульованих приводів, оптимізація завантаження електродвигунів, усунення тривалої роботи на холостому ходу, компенсація реактивної потужності, вирівнювання добового графіка навантаження і встановлення автоматизованої системи технічного обліку електроенергії.

Таким чином, аналіз енергоспоживання ЦГПТЛ показує, що найбільшу частку у вартісній структурі енергоресурсів формують природний газ, електрична енергія та пара. Основним споживачем природного газу є ковпакове пічне обладнання, а основним споживачем електроенергії — прокатні стани. Подальше дослідження доцільно спрямувати на вдосконалення режимів роботи саме цих груп обладнання, оскільки навіть відносно невелике зниження їх питомого енергоспоживання може забезпечити значний економічний ефект у масштабах річної виробничої програми.

1.6 Можливі заходи підвищення енергоефективності у галузі обробки металу тиском

Одним із найбільш доступних напрямів енергозбереження у прокатному виробництві є перехід від нерегульованих електроприводів до частотно-регульованих. Насоси гартувальних установок, вентилятори методичних печей і систем охолодження нерідко працюють із номінальною продуктивністю незалежно від фактичного навантаження. Регулювання подачі води засувками супроводжується значними гідравлічними втратами, а робота вентиляторів із постійною швидкістю призводить до перевитрати електроенергії. Використання регульованих приводів дозволяє узгодити продуктивність обладнання з технологічною потребою та скоротити непродуктивне споживання енергії.

Значний ефект може забезпечити поєднання безперервного розливання сталі з подальшою прокаткою. Розміщення машини безперервного лиття заготовок поблизу прокатного стану дає змогу використовувати фізичну теплоту гарячих слябів, скоротити тривалість їх повторного нагрівання та зменшити утворення окалини. Найбільш реалістичним для діючих підприємств є гарячий посад слябів у нагрівальні печі, що за сприятливих умов може зменшити витрати палива приблизно на 30%.

Упровадження транзитної прокатки обмежується віддаленістю прокатного стану від МБЛЗ, нерівномірним охолодженням слябів і складністю підтримання необхідної температури металу. Тому важливими є теплоізольоване транспортування заготовок, контроль температури та оптимізація виробничого графіка. Додаткового ефекту можна досягти скороченням кількості проходів до технологічно необхідного мінімуму, оскільки частина енергії витрачається на тертя, реверсування приводу та допоміжні операції.

Перспективним методом є асиметрична прокатка, за якої робочі валки обертаються з різними лінійними швидкостями. Зміна коефіцієнта асиметрії

дозволяє керувати силою прокатки, навантаженням приводів і властивостями готового металу. Експериментальні дослідження показують, що зі збільшенням коефіцієнта асиметрії до 1,2 сила прокатки знижується. Це сприяє скороченню електроспоживання, підвищенню точності геометричних розмірів і поліпшенню якості поверхні прокату.

Іншим напрямом є застосування індукційного нагрівання слябів. Найбільш доцільним є комбінований варіант, за якого метал попередньо нагрівається у газовій печі, а перед прокаткою його температура та температурне поле коригуються індукційною установкою. Така система забезпечує високу швидкість нагрівання, точне регулювання температури, зменшення окиснення й обезвуглецювання металу.

Індукційне обладнання має компактні розміри та може споживати суттєво менше кінцевої енергії, ніж газові нагрівачі. Проте його використання потребує значних початкових інвестицій і залежить від співвідношення вартості електроенергії та газу. Тому для великих слябів найбільш раціональним є гібридне поєднання газового та індукційного нагрівання.

Ефективним маловитратним заходом є низькотемпературна прокатка, сутність якої полягає у зниженні температури початку деформації приблизно на 100–400 °C. За даними досліджень, економія енергії може становити 120–195 МДж/т, а під час прокатування нержавіючих сталей — 13–20%. Водночас зниження температури підвищує навантаження на валки та електроприводи, тому цей метод придатний переважно для станів із достатньою механічною міцністю і встановленою потужністю.

Перспективним є також застосування технологічних мастил під час гарячої прокатки. Мастильні матеріали знижують коефіцієнт тертя, силу прокатки, крутний момент і витрату електроенергії. Одночасно зменшується зношування робочих валків, кількість окалини, частота перевалок і тривалість ремонтних простоїв. Це сприяє підвищенню продуктивності стану та якості поверхні металу.

Таким чином, основними напрямами підвищення енергоефективності обробки металу тиском є модернізація електроприводів, гарячий посад слябів, асиметрична й низькотемпературна прокатка, комбіноване нагрівання та застосування технологічних мастил. Вибір конкретного рішення має здійснюватися на підставі техніко-економічного аналізу.

1.7 Аналіз заходів з підвищення енергетичної ефективності цеху гарячої прокатки

Найбільша економія паливно-енергетичних ресурсів зазвичай досягається внаслідок масштабної модернізації технологій і заміни застарілого обладнання. Водночас поряд із капіталомісткими проєктами доцільно впроваджувати маловитратні організаційні та режимні заходи, які мають короткий термін реалізації й окупності.

Одним із таких заходів є регулювання подачі ежекторного повітря на ковпакових печах. У наявній системі під час автоматичного припинення подачі природного газу повітря продовжує надходити під ковпак, прискорюючи охолодження садки та наближаючи наступне включення пальників. Установлення двопозиційного клапана, електрично пов’язаного з газовим клапаном, дозволить одночасно припиняти подачу газу й повітря та зменшити витрати палива.

Для скорочення електроспоживання стендів прискореного охолодження доцільно встановити реле часу. Це забезпечить автоматичне відключення вентиляторів після завершення необхідного періоду охолодження та усуне їх тривалу непродуктивну роботу.

Додаткову економію природного газу може забезпечити рециркуляція продуктів згоряння ковпакових печей. Часткове повернення нагрітих відхідних

газів у робочу зону дозволить використати їх залишкову теплоту, стабілізувати температурний режим і скоротити витрати свіжого палива.

На прокатному стані доцільно модернізувати систему керування емульсійними насосами. Під час перевалювання робочих валків ці насоси не беруть участі у технологічному процесі, але продовжують працювати. Автоматичне відключення насосів у періоди перевалки дозволить зменшити непродуктивне електроспоживання та зношування обладнання.

Зниження витрат природного газу можливе також шляхом оптимізації режиму відпалу рулонного прокату. Пропонується скоротити основну високотемпературну витримку на одну годину та збільшити тривалість охолодження металу під нагрівальним ковпаком. Для збереження накопиченої теплоти вихлопні труби необхідно обладнати шиберними заслінками, які після відключення пальників обмежуватимуть природну тягу.

Суттєвим технічним заходом є модернізація електроприводів прокатного стану із заміною системи «генератор — двигун» на систему «тиристорний перетворювач — двигун». Наявне електромашинне обладнання фізично зношене та потребує частих ремонтів. Перехід на тиристорне керування підвищить ККД і точність регулювання швидкості, стабілізує режими прокатки, покращить якість металу та збільшить міжремонтний період приблизно вдвічі.

Значні теплові втрати ковпакових печей пов’язані зі зношенням шамотної футеровки. Її заміна сучасними волокнистими теплоізоляційними матеріалами зменшить теплову інерцію конструкції, втрати через корпус печі та тривалість виходу обладнання на робочу температуру. У результаті скоротиться витрата природного газу на один цикл відпалу.

Отже, першочерговими заходами для ЦГПТЛ є синхронізація подачі газу та ежекторного повітря, встановлення реле часу, рециркуляція відхідних газів, автоматичне відключення насосів, оптимізація режиму відпалу, модернізація електроприводів і заміна футеровки ковпакових печей. Комплексне впровадження цих рішень дозволить зменшити питомі витрати природного газу

та електроенергії, підвищити надійність обладнання і знизити собівартість прокату.

1.8 Техніко-економічне обґрунтування впровадження

Висока енергоємність металургійного виробництва, нестабільність енергопостачання та зростання вартості паливно-енергетичних ресурсів зумовлюють необхідність системного підходу до енергозбереження. Енергетичне господарство металургійного підприємства доцільно розглядати як складну взаємопов’язану систему, до якої входять трансформаторні підстанції, електроприводи прокатних станів, насосні та вентиляційні установки, нагрівальні й термічні печі, системи освітлення, стисненого повітря та допоміжного енергопостачання. Оптимізація окремого агрегату без урахування режимів роботи суміжного обладнання не завжди забезпечує очікуваний результат. Тому заходи мають охоплювати технічний стан устаткування, організацію виробництва, графіки навантаження та систему обліку енергоресурсів.

Актуальність таких рішень посилюється зростанням виробничого навантаження ПАТ «Запоріжсталь». У 2024 році підприємство виробило близько 3,1 млн т чавуну, 2,9 млн т сталі та відвантажило понад 2,4 млн т прокату. Протягом цього періоду комбінат працював приблизно на 75% доступної потужності. У 2025 році обсяг виробництва чавуну збільшився до 3,568 млн т, сталі — до 3,212 млн т, а відвантаження прокату — до 2,795 млн т. Порівняно з 2024 роком приріст становив відповідно близько 14,9%, 11,1% і 15,2%. Збільшення випуску продукції супроводжується зростанням навантаження на електроприводи, трансформатори, насоси, вентиляційні системи та термічне обладнання, тому навіть незначне скорочення питомих витрат енергії може забезпечити значний річний економічний ефект.

Водночас зниження абсолютного енергоспоживання не завжди свідчить про підвищення енергоефективності. Середня споживана потужність підприємств Групи «Метінвест» у 2024 році становила близько 672 МВт проти 1405 МВт у довоєнному 2021 році. Така різниця значною мірою пояснюється скороченням виробничих потужностей, воєнними ризиками та обмеженнями енергопостачання. Отже, результативність запропонованих заходів необхідно оцінювати за питомими показниками — витратами електроенергії, природного газу та інших ресурсів на одну тонну готового прокату.

Значна частина непродуктивних витрат у ЦГПТЛ пов’язана з фізичним і моральним зношенням обладнання, роботою електроприймачів на холостому ходу, завищеною встановленою потужністю двигунів, нерівномірним графіком навантаження та недостатньою автоматизацією допоміжних процесів. Додатковими чинниками є теплові втрати через футеровку ковпакових печей, видалення нагрітих продуктів згоряння без використання їхньої залишкової теплоти та відсутність автоматичного відключення окремих механізмів під час технологічних пауз.

Під час вибору заходів перевагу надано рішенням, які не потребують повної реконструкції цеху, можуть бути реалізовані поетапно і не порушують безперервності виробництва. Першочерговим принципом є усунення непродуктивної роботи ввімкненого обладнання. Зокрема, модернізація системи керування емульсійними насосами прокатного стану дозволить автоматично відключати їх під час перевалювання валків та інших технологічних пауз. Це скоротить не лише витрати електроенергії, а й зношування насосів, арматури та трубопроводів.

Установлення реле часу на стендах прискореного охолодження забезпечить контроль фактичної тривалості роботи вентиляторів. Після досягнення заданої температури рулонів система автоматично припинятиме охолодження, що усуне залежність тривалості роботи обладнання від дій персоналу. Перевагами цього заходу є незначні капітальні витрати, простота монтажу та короткий строк окупності.

Окремим напрямом є приведення потужності електродвигунів у відповідність до фактичного навантаження. Робота двигуна із суттєвим недовантаженням супроводжується зниженням коефіцієнта корисної дії та коефіцієнта потужності. Тому заміна електродвигуна розмотувача на агрегат меншої номінальної потужності має здійснюватися після вимірювання робочих струмів, моменту, тривалості пуску та максимального навантаження. Правильно підібраний двигун зменшить активні й реактивні втрати без погіршення продуктивності стану.

Для ковпакових печей доцільно замінити зношену шамотну футеровку сучасними волокнистими теплоізоляційними матеріалами. Керамічне волокно характеризується низькою теплопровідністю та меншою теплоакумулювальною здатністю. Його застосування дозволяє скоротити тривалість розігрівання печі, зменшити витрати природного газу й температуру зовнішньої поверхні корпусу. Орієнтовно температура зовнішньої обшивки стін може бути знижена до 45–55 °С, а поду та склепіння — до 55–65 °С. Одночасно товщина футеровки може бути зменшена приблизно на 150–300 мм, що полегшує конструкцію та збільшує корисний робочий простір.

Ще одним перспективним рішенням є часткова рециркуляція продуктів згоряння. У традиційній схемі нагріті димові гази після передачі частини теплоти муфелю видаляються в атмосферу. Повернення контрольованої частини газів до теплового контуру дасть змогу використати їхню залишкову теплоту, стабілізувати температурне поле та знизити потребу в природному газі. Реалізація заходу потребує контролю температури, тиску, складу димових газів і співвідношення «газ — повітря», щоб не допустити погіршення процесу горіння.

Важливе значення має оптимізація трансформаторної підстанції. За умов зниженого або нерівномірного навантаження одночасна робота кількох трансформаторів може супроводжуватися надлишковими втратами холостого ходу. Перед виведенням одного трансформатора в резерв необхідно проаналізувати добові графіки потужності, допустиме завантаження

обладнання, категорію надійності споживачів і можливість автоматичного введення резерву. Такий режим доцільний лише за умови, що трансформатор, який залишається в роботі, не перевантажується у години максимуму.

Вирівнювання графіка навантаження цеху передбачає рознесення в часі запусків потужних електродвигунів, узгодження роботи прокатних станів і допоміжного обладнання, а також перенесення частини операцій за межі годин максимального споживання. Це дозволить зменшити пікову потужність, навантаження на трансформатори й кабельні лінії та ризик застосування зовнішніх обмежень електропостачання.

Для систем освітлення, вентиляції та повітряно-теплових завіс доцільно впровадити автоматизовані графіки ввімкнення і вимкнення. Режими роботи такого обладнання мають залежати від змінності персоналу, температури, концентрації забруднювальних речовин, відкривання воріт та фактичної присутності людей. Це дасть змогу уникнути цілодобової роботи допоміжних систем за відсутності технологічної потреби.

Обґрунтованість системного підходу підтверджується функціонуванням на ПАТ «Запоріжсталь» сертифікованої системи енергетичного менеджменту. У 2025 році підприємство пройшло ресертифікаційний аудит на відповідність вимогам ISO 50001:2018, під час якого перевірялися виробничі, прокатні та енергетичні підрозділи. Це створює організаційні передумови для постійного контролю енергетичних показників і перевірки фактичного ефекту від упроваджених рішень.

Таким чином, у роботі пропонується комплекс взаємопов’язаних заходів: оптимізація режиму роботи трансформаторної підстанції; вирівнювання добового графіка навантаження; автоматизація роботи освітлення, вентиляції й теплових завіс; відключення емульсійних насосів під час технологічних пауз; установлення реле часу на стендах охолодження; заміна недовантаженого електродвигуна; модернізація футеровки ковпакових печей і використання теплоти відхідних газів. Їхнє поетапне впровадження дозволить скоротити питомі витрати електроенергії та природного газу, зменшити максимальне

навантаження, підвищити надійність обладнання і знизити енергетичну складову собівартості прокату.

2 РОЗРАХУНОК ЗАХОДІВ З ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ ЦГПТЛ ПАТ «ЗАПОРІЖСТАЛЬ»

2.1 Оптимізація роботи трансформаторної підстанції

Розглядаючи структуру енергоспоживання цеху гарячої прокатки тонкого листа, особливу увагу необхідно приділяти роботі силових трансформаторів. Саме через них здійснюється живлення основних електроприводів прокатних клітей, рольгангів, насосних станцій, вентиляторів, димососів, систем охолодження, освітлення та іншого допоміжного обладнання. Навантаження цих споживачів протягом доби є нерівномірним і залежить від виробничої програми, кількості працюючих агрегатів, тривалості технологічних і аварійних простоїв, а також від режиму роботи прокатного стану.

Під час інтенсивного прокатування навантаження трансформаторів може наближатися до номінального значення. Натомість у міжзмінний період, під час ремонту, технологічної зупинки або роботи цеху зі зниженою продуктивністю споживана потужність різко зменшується. При цьому трансформатор продовжує залишатися під напругою і споживати енергію на намагнічування осердя, навіть якщо його вторинне навантаження є незначним.

За таких умов абсолютні втрати в обмотках зменшуються, але постійні втрати холостого ходу залишаються практично незмінними. У результаті частка втрат у загальному обсязі переданої енергії зростає, а коефіцієнт корисної дії трансформатора знижується. Особливо помітним це стає при тривалій експлуатації кількох паралельно увімкнених трансформаторів із завантаженням, значно нижчим за номінальне.

У системі електропостачання прокатного цеху трансформатори повинні забезпечувати не лише економічність, а й надійність. Наявність резервного трансформатора дає можливість зберегти живлення відповідальних механізмів у разі аварії або проведення ремонту. Водночас резервування не означає, що всі

встановлені трансформатори повинні постійно працювати паралельно. За зменшення навантаження доцільно залишати в роботі таку кількість агрегатів, яка забезпечить допустимий коефіцієнт завантаження, а частину обладнання перевести в резерв.

Втрати активної потужності в трансформаторі традиційно поділяють на дві основні складові: втрати холостого ходу та навантажувальні втрати. Втрати холостого ходу часто називають втратами в сталі, оскільки вони виникають переважно в магнітопроводі трансформатора. Навантажувальні втрати називають втратами в міді, хоча в сучасних трансформаторах обмотки можуть виготовлятися як із міді, так і з алюмінію.

Втрати в сталі виникають унаслідок перемагнічування осердя та появи вихрових струмів у його пластинах. Для їх зниження магнітопроводи складають із тонких ізольованих листів електротехнічної сталі. Такі втрати залежать переважно від напруги, частоти, властивостей матеріалу осердя та конструкції трансформатора. У межах нормального режиму вони майже не залежат від потужності навантаження.

Для промислових трансформаторів старіших серій втрати холостого ходу можуть орієнтовно становити близько 0,2–0,5% номінальної потужності. Наприклад, для трансформатора потужністю 2500 кВА це відповідає приблизно 5–12,5 кВт постійних втрат. Якщо такий трансформатор залишається під напругою протягом усього року, річні втрати холостого ходу визначаються за формулою:

$$W_0 = P_0 \cdot t$$

де: W_0 — річні втрати холостого ходу, кВт·год;

P_0 — втрати холостого ходу (активна потужність намагнічування), кВт;

t — час роботи трансформатора під напругою за рік, год.

За втрат холостого ходу 8 кВт та часу роботи 8760 год на рік отримаємо:

$$W_0 = 8 \cdot 8760 = 70\,080 \text{ кВт·год} \quad (2.1)$$

Таким чином, навіть один ненавантажений або слабко завантажений трансформатор може втрачати близько 70 тис. кВт·год електроенергії на рік. Для групи з чотирьох таких трансформаторів сумарні постійні втрати можуть перевищити 280 тис. кВт·год.

Навантажувальні втрати виникають унаслідок проходження струму через активний опір обмоток. Вони пропорційні квадрату струму, тому визначаються за залежністю:

$$P_н = P_к.н \cdot \beta^2 \quad (2.2)$$

де P_к.н — навантажувальні втрати при номінальному струмі, кВт;

β — коефіцієнт завантаження трансформатора (S / S_н).

Якщо при номінальному навантаженні втрати в обмотках становлять 25 кВт, то при завантаженні 50% (β = 0.5) вони дорівнюватимуть:

$$P_н = 25 \cdot 0.5^2 = 6.25 \text{ кВт}$$

При завантаженні 25% (β = 0.25) вони зменшаться до:

$$P_н = 25 \cdot 0.25^2 = 1.56 \text{ кВт}$$

Отже, навантажувальні втрати дуже швидко зменшуються зі зниженням навантаження, тоді як втрати холостого ходу залишаються майже постійними. Саме тому при малих навантаженнях основну частину загальних втрат трансформатора становлять втрати в магнітопроводі.

Сумарні активні втрати трансформатора визначаються як:

$$\Delta P = P_0 + P_к.н \cdot \beta^2 \quad (2.3)$$

Коефіцієнт корисної дії (ККД) трансформатора становить:

$$\eta = (\beta \cdot S_н \cdot \cos\varphi) / (\beta \cdot S_н \cdot \cos\varphi + P_0 + P_{к.н} \cdot \beta^2) \quad (2.4)$$

Максимальне значення ККД досягається за умови, коли навантажувальні втрати дорівнюють втратам холостого ходу:

$$P_{к.н} \cdot \beta_{опт}^2 = P_0 \quad (2.5)$$

Звідси оптимальний коефіцієнт завантаження визначається як:

$$\beta_{опт} = \sqrt{(P_0 / P_{к.н})} \quad (2.6)$$

Якщо, наприклад, втрати холостого ходу становлять 8 кВт, а навантажувальні втрати при номінальному струмі — 32 кВт, то:

$$\beta_{опт} = \sqrt{(8 / 32)} = 0.5$$

У цьому випадку максимальний ККД досягається приблизно при 50% номінального навантаження. Для іншого трансформатора з меншими втратами холостого ходу оптимум може знаходитися на рівні 35–40%, а для сучасного трансформатора з удосконаленим магнітопроводом — на рівні 50–70%. Тому твердження про універсальний максимум ККД при 40–45% слід розглядати лише як орієнтовне значення для певних серій обладнання.

Європейські вимоги до енергоефективності силових трансформаторів установлюють граничні значення втрат холостого ходу, навантажувальних втрат або мінімальний індекс пікової ефективності. З 2021 року в ЄС діють посилені вимоги другого рівня, спрямовані на скорочення втрат трансформаторного обладнання.

Значення проблеми підтверджується загальними масштабами втрат. Європейська комісія зазначає, що впровадження стандартів ефективності вже суттєво знизило річні втрати електроенергії в трансформаторах порівняно зі сценарієм відсутності регулювання. Для трансформаторів, реалізованих у 1990 році, середні річні втрати оцінювалися приблизно у 22 МВт·год на одиницю; без регулювання до 2020 року вони могли б досягти 28 МВт·год.

У США нові стандарти енергоефективності розподільних трансформаторів, ухвалені у 2024 році, мають забезпечити за 30 років економію близько 4,6 квадрильйона БТЕ, або приблизно 10% від енергоспоживання обладнання, яке перебувало на ринку до впровадження вимог. Очікувана економія витрат оцінюється більш ніж у 14 млрд дол. США, а скорочення викидів — майже у 85 млн т CO_2.

Аналіз режимів роботи підстанцій цеху гарячої прокатки

Режим 1: Низьке навантаження та виведення в резерв

Виникає тоді, коли сумарна потужність навантаження становить менше 40–50% загальної номінальної потужності паралельно ввімкнених трансформаторів. У такій ситуації доцільно відключити один із них, що дозволить усунути його втрати холостого ходу та підвищити завантаження працюючого обладнання.

Наприклад, підстанція має два трансформатори потужністю по 2500 кВА. Загальне навантаження становить 1200 кВА. При паралельній роботі обох коефіцієнт завантаження кожного становить:

$$\beta = 1200 / (2 \cdot 2500) = 0.24$$

Якщо залишити в роботі один трансформатор, його завантаження становитиме:

$$\beta = 1200 / 2500 = 0.48$$

Припустимо, втрати холостого ходу одного трансформатора становлять 7 кВт, а номінальні навантажувальні втрати — 28 кВт. При роботі двох трансформаторів загальні втрати дорівнюватимуть:

$$\Delta P_2 = 2 \cdot (7 + 28 \cdot 0.24^2) = 17.23 \text{ кВт}$$

При роботі одного трансформатора:

$$\Delta P_1 = 7 + 28 \cdot 0.48^2 = 13.45 \text{ кВт}$$

Економія потужності становитиме:

$\Delta P_екон = 17.23 - 13.45 = 3.78$ кВт

Якщо такий режим триває 5000 год на рік, річна економія електроенергії становитиме:

$$W_екон = 3.78 \cdot 5000 = 18\,900 \text{ кВт·год}$$

Режим 2: Високе навантаження та тепловий знос

Виникає, коли сумарне навантаження перевищує 70–75% номінальної потужності працюючих трансформаторів. Тривала експлуатація обладнання при такому завантаженні збільшує втрати в обмотках, нагрівання ізоляції та швидкість її старіння. У цьому випадку доцільно підключити резервний трансформатор.

Оскільки навантажувальні втрати зростають пропорційно квадрату струму, при підвищенні коефіцієнта завантаження з 0.75 до 1.0 втрати в обмотках збільшуються на 78%:

$$1.0^2 / 0.75^2 = 1.78$$

Режим 3: Різка нерівномірність графіка навантаження

Протягом зміни завантаження трансформатора може становити 70–80%, а під час простою знижуватися до 10–20%. Для мінімізації втрат необхідна система автоматизованого обліку, яка контролює активну/реактивну потужність, струми фаз, коефіцієнт потужності, температуру обмоток та напругу, оптимізуючи кількість працюючих одиниць.

При заміні застарілих трансформаторів оцінюють повну вартість життєвого циклу. Енергоефективні трансформатори з використанням високоякісної холоднокатаної сталі та оптимізованого магнітопроводу дозволяють знизити загальні втрати на 20–60%.

Доцільність заміни оцінюють через річну економію електроенергії за формулою:

$$\Delta W = (\Delta P_стар - \Delta P_нов) \cdot t \qquad (2.7)$$

Якщо старий трансформатор у середньому втрачає 35 кВт, а новий — 22 кВт, при 7000 год роботи на рік економія дорівнюватиме:

$$\Delta W = (35 - 22) \cdot 7000 = 91\ 000\ кВт{\cdot}год$$

За умовної вартості електроенергії 6 грн/кВт·год річний економічний ефект становитиме близько 546 000 грн. При різниці інвестицій у 2 000 000 грн простий строк окупності нового обладнання складе близько 3.7 року.

Рекомендовані заходи для підвищення ефективності підстанцій цеху:

- Постійний інструментальний контроль фактичного завантаження трансформаторів.
- Визначення оптимальних точок перемикання кількості працюючих трансформаторів.
- Компенсація реактивної потужності (зниження струму навантаження та втрат в обмотках).

- Вирівнювання фазних навантажень для усунення несиметрії струмів.
- Контроль рівня вищих гармонік та застосування фільтрокомпенсуючих пристроїв.
- Регулярне тепловізійне обстеження контактних з'єднань і магнітопроводів.
- Своєчасне технічне обслуговування, очищення радіаторів та систем охолодження.
- Заміна застарілих трансформаторів на сучасні енергоефективні аналоги (з урахуванням вартості життєвого циклу).

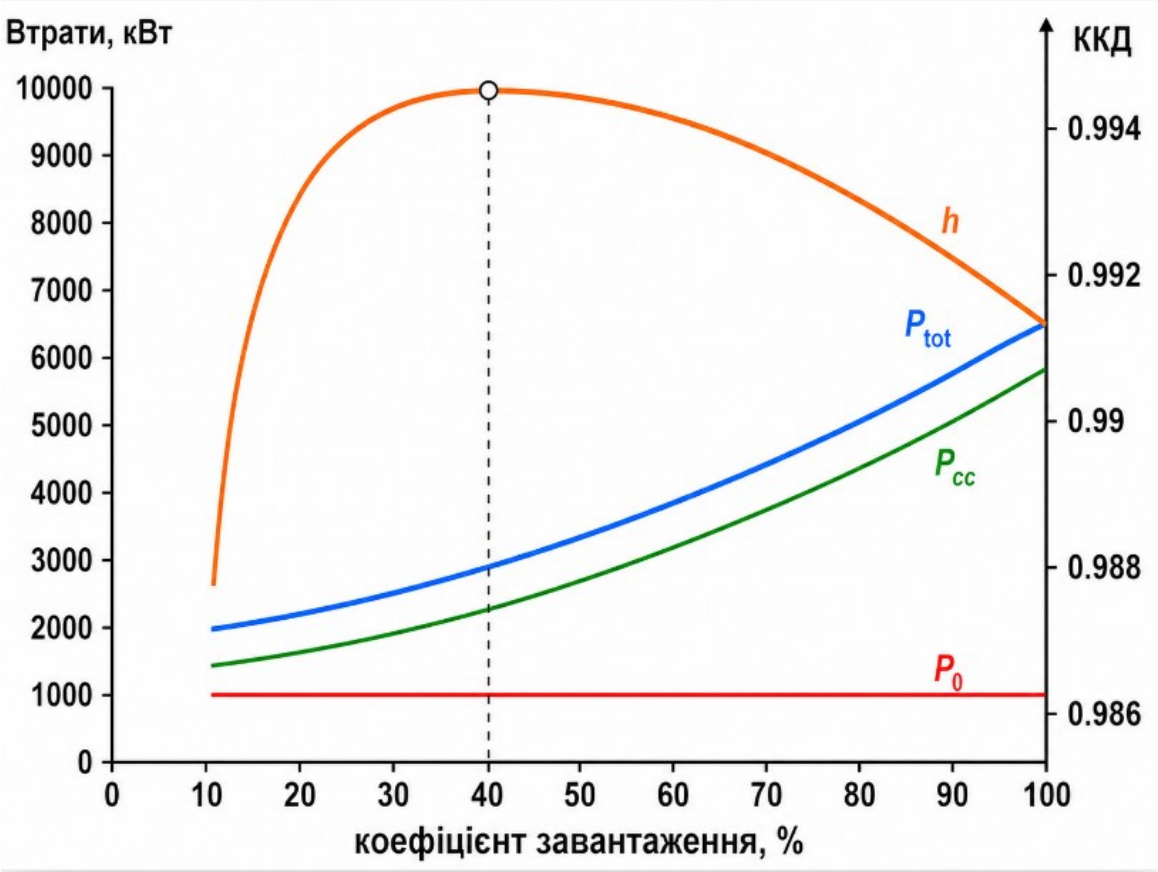


Рисунок 2.1 – Залежність між ККД трансформатора і коефіцієнтом завантаження

Залежно від призначення та конструкції електротехнічного обладнання навантаження промислової мережі може мати активний, індуктивний, ємнісний або змішаний характер. До активних споживачів належать електронагрівальні

установки, печі опору й освітлювальні прилади з резистивними елементами. Індуктивне навантаження створюють асинхронні двигуни, трансформатори, дроселі та зварювальне обладнання. Ємнісний характер мають конденсаторні установки, кабельні лінії та окремі електронні перетворювачі.

Електричне навантаження насосної станції має переважно активно-індуктивний характер, оскільки основними споживачами електроенергії тут є асинхронні електродвигуни насосних агрегатів. Активна складова потужності перетворюється в корисну механічну енергію обертання вала насоса, завдяки якій забезпечуються подача води, створення необхідного тиску та подолання гідравлічного опору трубопроводів. Частина активної енергії втрачається у вигляді тепла в обмотках двигунів, кабельних лініях, підшипниках і механічних передачах.

Разом з активною потужністю насосні електродвигуни споживають із мережі реактивну потужність. Вона необхідна для створення змінного магнітного поля в повітряному проміжку асинхронного двигуна. Реактивна енергія безпосередньо не перетворюється на механічну роботу, однак без неї функціонування електродвигуна було б неможливим. Протягом кожного періоду змінного струму ця енергія передається від мережі до магнітного поля обладнання, а потім частково повертається назад.

Повна потужність електричного навантаження складається з активної та реактивної складових і визначається співвідношенням:

$$S=\sqrt{P^2+Q^2} \quad , \tag{2.8}$$

де S — повна потужність, кВА; P — активна потужність, кВт; Q — реактивна потужність, квар.

Співвідношення між активною і повною потужністю характеризується коефіцієнтом потужності:

$$\cos \varphi = P / S. \tag{2.9}$$

Чим ближче значення cos φ до одиниці, тим ефективніше використовується пропускна здатність трансформаторів, кабельних ліній та комутаційного обладнання. Для промислових електродвигунів коефіцієнт потужності залежить від їхньої номінальної потужності й фактичного завантаження. Найгірші показники спостерігаються під час холостого ходу або роботи з малим навантаженням, коли двигун продовжує споживати значний намагнічувальний струм, але виконує невелику корисну роботу.

Для асинхронних двигунів насосних агрегатів при завантаженні, близькому до номінального, коефіцієнт потужності зазвичай перебуває в межах приблизно 0,80–0,90. При зниженні завантаження до 25–40% він може зменшуватися до 0,50–0,70. Тому робота потужного насоса в режимі малої подачі або тривалого холостого ходу супроводжується не лише низьким ККД, а й непродуктивним збільшенням реактивного навантаження мережі.

Значення електродвигунних систем для промислового енергоспоживання є дуже великим. Вони застосовуються в насосах, вентиляторах, компресорах, конвеєрах, прокатних станах та іншому технологічному обладнанні. Міжнародне енергетичне агентство відносить моторні системи до найбільших груп промислових споживачів електричної енергії, а статистика енергоспоживання промисловості підтверджує значну роль приводів машин і механізмів у загальному електричному навантаженні підприємств.

Розглянемо умовний насосний електропривод, який споживає активну потужність 1000 кВт. Якщо коефіцієнт потужності дорівнює 0,70, повна потужність становитиме:

$$S_1 = 1000 / 0{,}70 = 1429 \text{ кВА}.$$

Реактивна потужність у цьому режимі дорівнює приблизно:

$$Q_1 = \sqrt{(1429^2 - 1000^2)} \approx 1020 \text{ квар}.$$

Після компенсації реактивної потужності та підвищення коефіцієнта потужності до 0,95 повна потужність зменшиться до:

$$S_2 = 1000 / 0{,}95 = 1053 \text{ кВА},$$

а реактивна потужність — приблизно до 329 квар. Таким чином, реактивне навантаження мережі скоротиться майже на 691 квар, а струм у трансформаторі та кабельній лінії зменшиться приблизно на 26%.

Оскільки втрати активної потужності в провідниках пропорційні квадрату струму, зниження струму на 26% теоретично може скоротити відповідну складову втрат приблизно на 45%. Проте фактична економія електроенергії по всій насосній станції буде меншою, оскільки частина втрат не залежить від струму навантаження.

Низький коефіцієнт потужності має декілька негативних наслідків. По-перше, збільшуються струми в обмотках трансформаторів і кабельних лініях. По-друге, зростають втрати електроенергії та падіння напруги. По-третє, зменшується резерв пропускної здатності трансформаторів, розподільних пристроїв і кабелів. По-четверте, підприємство може нести додаткові витрати, пов’язані з перетіканням реактивної електроенергії.

Наприклад, трансформатор потужністю 1600 кВА при коефіцієнті потужності 0,70 може передати навантаженню лише:

$$P = 1600 \cdot 0{,}70 = 1120 \text{ кВт}$$

активної потужності. Після підвищення cos φ до 0,95 через той самий трансформатор можна передати:

$$P = 1600 \cdot 0{,}95 = 1520 \text{ кВт}.$$

Отже, компенсація реактивної потужності дозволяє без заміни трансформатора вивільнити до 400 кВт його пропускної здатності.

Для зменшення реактивного навантаження на насосних станціях використовують конденсаторні установки, синхронні двигуни або активні компенсатори. Найпоширенішим рішенням є встановлення батарей конденсаторів. Вони генерують ємнісну реактивну потужність, яка частково компенсує індуктивну потужність електродвигунів безпосередньо в місці її споживання.

Необхідна потужність компенсуючої установки визначається за формулою:

$$Q_к = P(\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2), \qquad (2.10)$$

де P — активна потужність навантаження; φ_1 — кут зсуву фаз до компенсації; φ_2 — кут після компенсації.

Для навантаження 1000 кВт при підвищенні коефіцієнта потужності з 0,70 до 0,95 необхідна потужність конденсаторної установки становитиме приблизно 690 квар. На практиці доцільно використовувати автоматичну ступінчасту установку, наприклад на 700 квар, яка вмикає або вимикає окремі секції залежно від фактичного режиму насосної станції.

Постійне підключення всієї конденсаторної батареї є недоцільним, якщо кількість працюючих насосів змінюється. При зупиненні електродвигунів може виникнути перекомпенсація, за якої навантаження набуває ємнісного характеру, а напруга в мережі підвищується. Тому сучасні установки оснащуються автоматичними регуляторами реактивної потужності.

Компенсація повинна здійснюватися якомога ближче до джерела реактивного навантаження. Індивідуальна компенсація безпосередньо біля потужного електродвигуна зменшує струм не лише в трансформаторі, а й у кабелі, що живить двигун. Групова компенсація на секції шин простіша в

експлуатації, однак не усуває перетікання реактивної потужності у внутрішніх лініях між секцією та окремими двигунами.

ABB зазначає, що підвищення коефіцієнта потужності зменшує струм при незмінній активній потужності, вивільняє потужність електрообладнання та скорочує втрати в мережі. Індуктивні споживачі, зокрема двигуни й трансформатори, формують відстаючий коефіцієнт потужності, який коригується ємнісними установками.

Окрім компенсації реактивної потужності, важливим заходом є раціональне завантаження насосних електродвигунів. Робота декількох агрегатів із завантаженням по 30–40% часто є менш ефективною, ніж робота меншої кількості насосів при завантаженні 70–90%. Тому кількість увімкнених агрегатів повинна відповідати фактичній витраті води та необхідному тиску.

Застосування частотно-регульованого привода також змінює характер енергоспоживання насосної станції. Зменшення швидкості обертання дозволяє регулювати подачу без непродуктивного дроселювання. При цьому сучасний перетворювач може забезпечувати високий коефіцієнт потужності з боку мережі, хоча створює гармонічні складові струму. Тому під час вибору такого обладнання необхідно одночасно оцінювати економію електроенергії, коефіцієнт потужності та рівень гармонічних спотворень.

Отже, електричне навантаження насосної станції має виражений активно-індуктивний характер. Активна енергія забезпечує виконання корисної роботи, а реактивна необхідна для створення електромагнітного поля електродвигунів. Водночас надлишкове споживання реактивної енергії збільшує струми, втрати і завантаження елементів системи електропостачання.

Для підвищення енергоефективності насосної станції необхідно підтримувати коефіцієнт потужності орієнтовно на рівні 0,90–0,95, правильно підбирати кількість працюючих насосів, не допускати тривалого холостого ходу електродвигунів, застосовувати автоматичні конденсаторні установки й контролювати якість електричної енергії. Комплексне виконання цих заходів дозволяє зменшити втрати в трансформаторах і кабельних лініях, вивільнити

частину встановленої потужності та підвищити надійність електропостачання прокатного цеху.

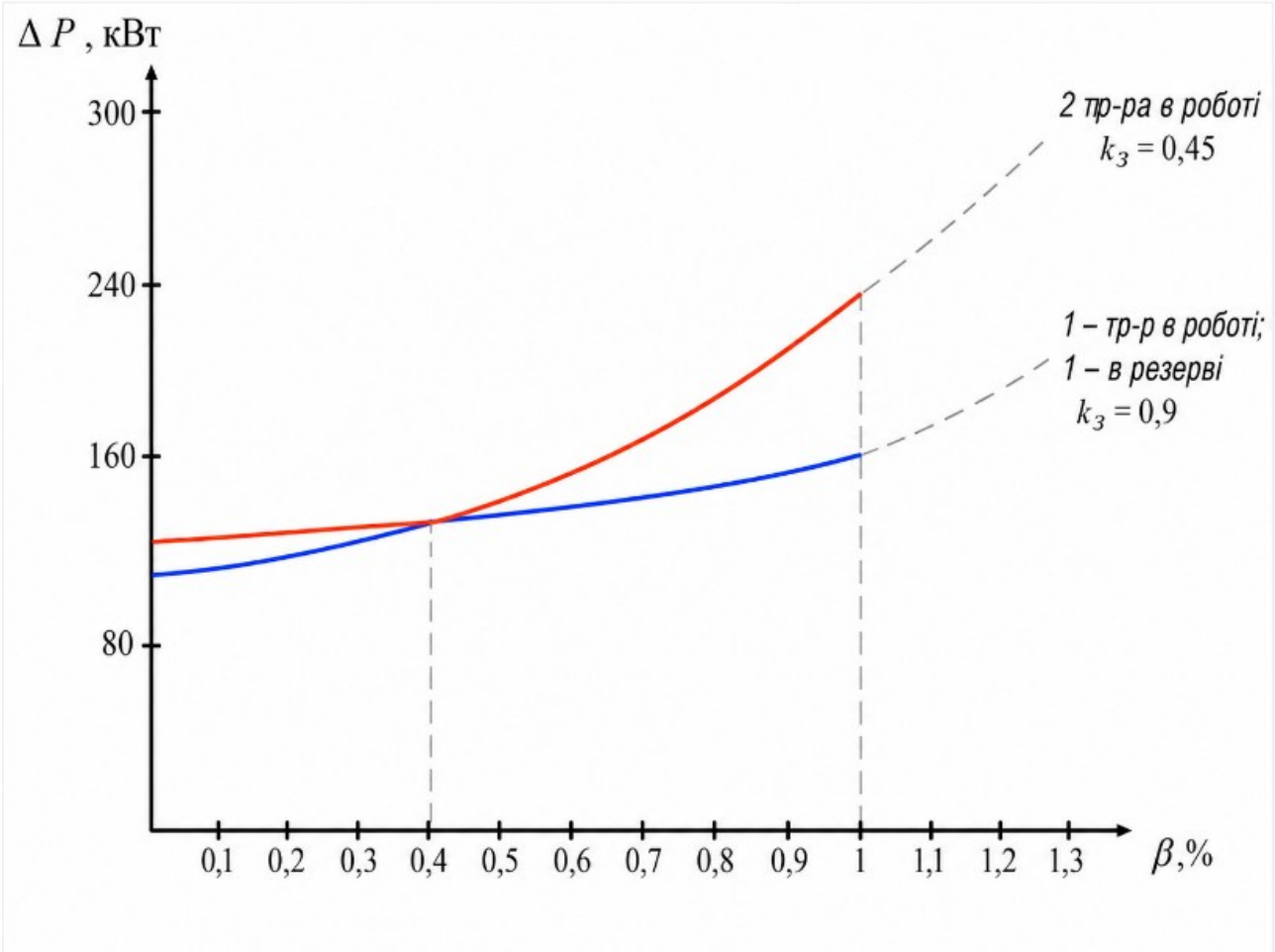


Рисунок 2.2 – Залежність між втратами трансформатора і коефіцієнтом завантаження

Коефіцієнт потужності є одним із основних показників ефективності використання електричної енергії на промисловому підприємстві. Він характеризує співвідношення між активною потужністю, яка безпосередньо перетворюється на корисну механічну, теплову або світлову енергію, та повною потужністю, що передається електричною мережею. В оптимальному режимі значення коефіцієнта потужності повинно наближатися до одиниці, оскільки це відповідає мінімальному споживанню реактивної потужності та найбільш раціональному використанню трансформаторів, кабельних ліній і комутаційного обладнання.

Для нескомпенсованих електроприймачів значення коефіцієнта потужності істотно залежить від типу, номінальної потужності та ступеня завантаження обладнання. Для асинхронних електродвигунів потужністю до 100 кВт цей показник зазвичай перебуває в межах 0,6–0,8. У двигунів потужністю від 100 до 250 кВт коефіцієнт потужності, як правило, є вищим і становить близько 0,8–0,9. Для зварювальних апаратів змінного струму характерними є значення 0,5–0,6, що пояснюється значним споживанням реактивної потужності та різкозмінним режимом роботи. Для люмінесцентних освітлювальних установок із відповідною пускорегулювальною апаратурою коефіцієнт потужності може становити приблизно 0,92.

Найнижчі значення коефіцієнта потужності асинхронних двигунів спостерігаються під час роботи з малим навантаженням або на холостому ходу. У такому режимі активна потужність зменшується, тоді як струм намагнічування залишається відносно стабільним. Унаслідок цього частка реактивної складової струму зростає, а коефіцієнт потужності знижується. Саме тому використання електродвигунів із невиправдано завищеною номінальною потужністю призводить не лише до зменшення їхнього коефіцієнта корисної дії, а й до погіршення режиму роботи всієї системи електропостачання.

Реактивне навантаження підприємства не є постійною величиною. Воно змінюється протягом року, місяця, доби та навіть однієї виробничої зміни. Такі коливання зумовлюються зміною кількості одночасно ввімкнених електроприймачів, ступенем завантаження насосів, вентиляторів, компресорів і прокатного обладнання, тривалістю їхньої роботи, частотою технологічних пауз та нерівномірністю виробничого процесу.

Наприклад, у насосних установках реактивна потужність залежить від графіка споживання води, кількості працюючих агрегатів та способу регулювання їхньої продуктивності. У разі регулювання подачі за допомогою засувки електродвигун може тривалий час працювати з недостатнім завантаженням, що спричиняє зниження коефіцієнта потужності. Аналогічна ситуація виникає під час нерегульованої роботи вентиляторів, димососів і

компресорів, продуктивність яких не відповідає фактичній потребі технологічного процесу.

На величину реактивного навантаження також впливають коливання напруги в мережі, технічний стан електродвигунів і трансформаторів, якість ремонтного обслуговування, стан контактних з'єднань, режим роботи зварювального обладнання та характер навантаження окремих виробничих дільниць. Підвищення напруги може спричиняти збільшення струму намагнічування електричних машин і трансформаторів, тоді як зниження напруги часто призводить до зростання робочих струмів і додаткових втрат у мережі.

Під час передавання реактивної потужності від джерела живлення до споживачів електричними мережами протікає додатковий струм, який не виконує корисної роботи. Проте цей струм завантажує трансформатори, кабельні та повітряні лінії, збільшує втрати активної енергії та викликає додаткові падіння напруги. Через це зменшується пропускна спроможність системи електропостачання і виникає необхідність застосування обладнання більшої номінальної потужності.

Компенсація реактивної потужності є одним із найбільш доступних і результативних заходів підвищення енергоефективності системи електропостачання. Її сутність полягає у встановленні джерел реактивної потужності безпосередньо біля споживачів або на шинах розподільних пристроїв. Найчастіше для цього використовують конденсаторні установки, які частково або повністю компенсують індуктивну реактивну потужність електродвигунів, трансформаторів, зварювальних апаратів та інших споживачів.

У разі змінного графіка навантаження доцільно застосовувати автоматичні конденсаторні установки зі ступінчастим регулюванням. Система керування постійно контролює значення коефіцієнта потужності та залежно від фактичного реактивного навантаження підключає або відключає окремі ступені

конденсаторів. Це дозволяє уникнути як недостатньої компенсації, так і перекомпенсації, за якої мережа набуває ємнісного характеру.

Упровадження компенсації реактивної потужності забезпечує зменшення струму в елементах електричної мережі, скорочення втрат електроенергії, зниження падіння напруги та розвантаження трансформаторів. Вивільнена потужність може бути використана для підключення додаткового технологічного обладнання без заміни наявних трансформаторів і кабельних ліній. Одночасно поліпшується якість електропостачання та підвищується надійність роботи електроприймачів.

Отже, компенсація реактивної потужності повинна розглядатися не як окремий локальний захід, а як складова комплексної системи енергетичного менеджменту підприємства. Найбільший ефект досягається у разі її поєднання з правильним вибором потужності електродвигунів, застосуванням частотно-регульованих приводів, своєчасним відключенням обладнання під час простоїв та постійним контролем параметрів електроспоживання.

2.1.1 Виведення недовантажених трансформаторів в резерв

Для передачі електроенергії споживачам на підстанції встановлено 4 трансформатори. Параметри трансформаторів , за допомогою яких передається електроенергія до споживачів наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 - Паспортні данні трансформаторів

Тип трансформатора	Номінальна потужність, кВА	$U_{к.з.},\%$	$I_{х.х.}$ % $I_{ном}$	Втрати, кВт		Кількість трансформаторів, шт
				хх	кз	
ТНМ-2500/10	2500	6,5	1,1	7,5	23,5	4

Для спрощення подальшого аналізу трансформатори позначено відповідно до їхнього розташування на підстанції: Т11, Т12, Т21 і Т22. Таке позначення дозволяє окремо розглядати режим роботи кожного агрегату, оцінювати його фактичне завантаження, тривалість роботи та участь у покритті загального навантаження підприємства.

Установлена потужність усіх трансформаторів становить 10 000 кВА. Такий резерв потужності необхідний для забезпечення надійного електропостачання технологічного обладнання, можливості проведення ремонтів і технічного обслуговування без повного припинення роботи споживачів. Наявність чотирьох трансформаторів також дає змогу змінювати схему їх паралельної роботи залежно від фактичного навантаження підстанції.

Тривалість розрахункового місяця прийнята рівною 744 годинам. Цей показник відповідає місяцю тривалістю 31 добу та використовується для оцінювання сумарного часу перебування трансформаторів під напругою. Кількість годин роботи під навантаженням, близьким до номінального, становить 650 годин. Решту часу обладнання може працювати зі зниженим навантаженням, у резерві або перебувати в режимі холостого ходу.

Трансформатор споживає електричну енергію навіть у тому випадку, коли до нього не підключено значне навантаження. Це пов’язано з постійними втратами в магнітопроводі, які виникають під час перебування обладнання під напругою. Для трансформатора ТНМ-2500/10 втрати холостого ходу становлять 7,5 кВт. Вони практично не залежать від величини навантаження і зберігаються протягом усього часу роботи трансформатора в мережі.

Крім постійних втрат, під час передавання електроенергії виникають навантажувальні втрати в обмотках. За номінального режиму їх паспортне значення становить 23,5 кВт на один трансформатор. На відміну від втрат холостого ходу, ця складова змінюється залежно від струму навантаження. Чим вище завантаження трансформатора, тим більшими стають втрати в його обмотках і струмопровідних елементах.

Струм холостого ходу трансформатора становить 1,1% від номінального значення. Він необхідний для створення магнітного потоку в осерді, однак не бере безпосередньої участі в передаванні активної потужності споживачам. Напруга короткого замикання, що дорівнює 6,5%, характеризує внутрішній опір трансформатора та впливає на величину падіння напруги під навантаженням, а також на струми в аварійних режимах.

За наявності чотирьох однакових трансформаторів особливого значення набуває вибір раціональної кількості агрегатів, які одночасно перебувають у роботі. Якщо навантаження підстанції є невисоким, одночасне ввімкнення всіх трансформаторів може призвести до збільшення сумарних втрат холостого ходу. У такому випадку доцільно частину обладнання вивести в резерв, а навантаження розподілити між меншою кількістю працюючих трансформаторів.

Разом із тим надмірне завантаження одного або двох агрегатів також є небажаним, оскільки воно супроводжується зростанням температури обмоток, прискоренням старіння ізоляції та збільшенням навантажувальних втрат. Тому режим роботи підстанції повинен забезпечувати компроміс між зменшенням кількості ввімкнених трансформаторів та недопущенням їх перевантаження.

Під час вибору оптимальної схеми необхідно враховувати добові й змінні графіки навантаження, категорію надійності споживачів, можливість автоматичного введення резерву та допустиме завантаження кожного трансформатора. За зниження виробничої активності один або кілька агрегатів можуть бути переведені в резерв. У періоди максимального навантаження кількість працюючих трансформаторів повинна збільшуватися.

Таким чином, вихідні паспортні дані та тривалість роботи трансформаторів створюють основу для подальшого оцінювання втрат електроенергії і вибору найекономічнішого режиму підстанції. Раціональне керування трансформаторами дозволяє скоротити непродуктивні витрати, підвищити коефіцієнт їх завантаження та зберегти необхідний рівень надійності електропостачання.

Розрахункові данні:

Втрати реактивної потужності трансформатора при холостому ході визначаються аналогічно для кожного, оскільки вони однакові:

$$Q_{xx}=S_{ном}\cdot\frac{I_{xx}}{100}, \quad (2.11)$$

де $S_{ном}$ – номінальна потужність;

I_{xx} – струм холостого ходу;

$$Q_{xx}=2500\cdot\frac{1,1}{100}=27,55 \text{ квар.}$$

Втрати реактивної потужності трансформатора при короткому замиканні:

$$Q_{кз}=S_{ном}\cdot\frac{U_{кз}}{100}, \quad (2.12)$$

де $U_{кз}$ – напруга короткого замикання;

$$Q_{кз}=2500\cdot\frac{6,5}{100}=162,225 \text{ квар.}$$

Середньо зважений коефіцієнт потужності Cos_{φ} = 0.8.

Коефіцієнт завантаження трансформатора T_{11} визначаємо з формули:

$$Кз=\frac{Ea}{S_{ном}\cdot T_{роб}\cdot Cos_{\varphi}}, \quad (2.13)$$

де Ea- витрати;

$T_{роб}$ - кількість годин роботи тр-ра під номінальним навантаженням;

$$Кз=\frac{78979}{2500\cdot650\cdot0,8}=0,0612.$$

Коефіцієнт завантаження трансформатора $Т_{12}$ визначаємо аналогічно до $Т_{11}$:

$$Кз=\frac{131631}{2500\cdot650\cdot0,8}=0,1.$$

Коефіцієнт завантаження трансформаторів T_{21}, та T_{22} , 0,14 та 0,4 відповідно.

Визначимо втрати активної та реактивної енергії за місяць для трансформатору $Т_{11}$.

Активна енергія:

$$\Delta Ea=P_{хх}\cdot T_п+P_{кз}\cdot К_з^{\,2}\cdot T_{роб}, \qquad (2.14)$$

де $P_{хх}$ – втрати холостого ходу;

$T_п$ – кількість годин роботи тр-ра за місяць;

$P_{кз}$ – втрати короткого замикання;

$К_з^{\,2}$ – коефіцієнт завантаження;

$$\Delta Ea=7,5\cdot744+23,5\cdot0,06^2\cdot650=5635.55 \text{ кВт·год.}$$

Реактивна енергія:

$$\Delta Ep=Q_{хх}\cdot T_п+Q_{кз}\cdot К_з^{\,2}\cdot T_{роб}, \qquad (2.15)$$

де $Q_{хх}$ – втрати реактивної потужності тр-ра при холостому ході;

$Q_{кз}$ – втрати реактивної потужності тр-ра при короткому замиканні;

$$\Delta Ep=27,5\cdot744+162,5\cdot0,06^2\cdot650=20840.111 \text{ квар·год}$$

Результат аналогічних розрахунків приведений в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Результати розрахунку

Назва	Втрати активної енергії, кВт·год	Втрати реактивної енергії, квар·год
Трансформатор$Т_{12}$	5733	21516
Трансформатор$Т_{21}$	5879	22530
Трансформатор$Т_{22}$	8024	37360

Коефіцієнт завантаження трансформатора має бути на рівні 0,6 – 0,7. Оскільки завантаження трансформаторів T_{11}, T_{12} та T_{21} значно менше від трансформатору T_{22} – то їх можна вивести в резерв, а споживачів перевести на діючий.

Результати розрахунку, наведені в таблиці 2.2, показують, що режими роботи трансформаторів Т12, Т21 і Т22 істотно відрізняються за величиною втрат активної та реактивної енергії. Сумарні втрати активної електроенергії трьох представлених трансформаторів за розрахунковий період становлять 19 636 кВт·год, а втрати реактивної енергії — 81 406 квар·год. Отримані значення підтверджують, що під час оцінювання ефективності роботи підстанції необхідно враховувати не лише передавання корисної активної потужності, а й реактивне навантаження, яке додатково завантажує трансформатори та внутрішню електричну мережу.

Найменші втрати активної енергії встановлено для трансформатора Т12 — 5733 кВт·год. Для трансформатора Т21 вони становлять 5879 кВт·год, тобто лише на 146 кВт·год, або приблизно на 2,5%, більше. Близькість цих показників свідчить про подібні режими завантаження зазначених трансформаторів і майже однакову тривалість їх перебування під напругою.

Втрати реактивної енергії трансформаторів Т12 і Т21 також є близькими: відповідно 21 516 і 22 530 квар·год. Різниця становить 1014 квар·год, або близько 4,7%. Отже, Т12 і Т21 працюють у приблизно однакових умовах, а відмінності між їхніми показниками можуть бути пов’язані з незначною нерівномірністю розподілу навантаження, різним складом підключених електроприймачів або неоднаковою тривалістю роботи в навантаженому режимі.

Найбільші втрати спостерігаються у трансформатора Т22. Активні втрати становлять 8024 кВт·год, що приблизно на 40% більше, ніж у Т12, і на 36,5% більше, ніж у Т21. Втрати реактивної енергії трансформатора Т22 дорівнюють 37 360 квар·год. Вони перевищують показник Т12 приблизно на 73,6%, а Т21 — на 65,8%.

У загальній структурі активних втрат частка трансформатора Т12 становить близько 29,2%, Т21 — 29,9%, а Т22 — 40,9%. У структурі реактивних втрат частка Т22 є ще більшою та досягає приблизно 45,9%. На Т12 припадає близько 26,4%, а на Т21 — 27,7% сумарних реактивних втрат.

Отримане співвідношення вказує, що трансформатор Т22 передає більшу частину навантаження підстанції. Ймовірно, до його шин підключено більшу кількість електроприймачів або більш потужне технологічне обладнання. Водночас підвищені втрати реактивної енергії можуть бути пов’язані з роботою асинхронних двигунів, насосів, вентиляторів, прокатних механізмів та іншого індуктивного обладнання з недостатнім коефіцієнтом потужності.

Відношення реактивних втрат до активних для трансформаторів Т12 і Т21 є приблизно однаковим і становить відповідно 3,75 та 3,83. Для трансформатора Т22 цей показник підвищується до 4,66. Це може свідчити про те, що навантаження Т22 має більшу реактивну складову. Тому під час подальшого аналізу доцільно перевірити коефіцієнт потужності приєднаних споживачів, наявність та стан конденсаторних установок, рівень завантаження електродвигунів і можливість локальної компенсації реактивної потужності.

Більші втрати Т22 не слід автоматично трактувати як ознаку його незадовільного технічного стану. Якщо трансформатор передає більший обсяг енергії, його абсолютні втрати закономірно будуть вищими. Для об’єктивного порівняння необхідно визначати питомі втрати, тобто відносити їх до кількості переданої активної електроенергії або до середнього навантаження кожного агрегату.

Окремого розгляду потребує режим роботи малозавантажених трансформаторів. Навіть за відсутності значного навантаження трансформатор, який залишається під напругою, має постійні втрати холостого ходу. Для трансформатора ТНМ-2500/10 вони становлять 7,5 кВт. Якщо кілька агрегатів тривалий час працюють із малим навантаженням, сумарні втрати холостого ходу можуть бути більшими, ніж економія від розподілу навантаження між ними.

У прийнятій методиці економічно доцільним вважається коефіцієнт завантаження трансформатора на рівні близько 0,6–0,7. За значно нижчого завантаження частка постійних втрат у загальних витратах електроенергії збільшується. У такому разі доцільно розглянути можливість виведення одного з малозавантажених трансформаторів у резерв і переведення його споживачів на інший агрегат.

Проте рішення про зміну схеми роботи підстанції не може ґрунтуватися лише на порівнянні втрат. Перед виведенням трансформатора в резерв необхідно перевірити:

фактичне максимальне навантаження трансформатора, який залишатиметься в роботі;

можливість проходження ранкового, денного та вечірнього максимумів без перевантаження;

категорію надійності електропостачання споживачів;

наявність автоматичного введення резерву;

пропускну спроможність секцій шин, кабельних ліній і комутаційних апаратів;

допустимий рівень падіння напруги;

можливість оперативного підключення резервного агрегату у разі аварії.

За результатами таблиці найбільш логічним є поетапний розгляд виведення в резерв одного з близьких за характеристиками трансформаторів — Т12 або Т21. Вибір між ними має здійснюватися з урахуванням фактичного розташування споживачів, стану комутаційного обладнання, довжини ліній та рівня напруги на найбільш віддалених електроприймачах. Одночасне виведення кількох трансформаторів допустиме лише після підтвердження, що агрегат, який залишається в роботі, здатний прийняти сумарне навантаження без перевищення допустимих температур і струмів.

Вирівнювання навантаження між працюючими трансформаторами також може дати позитивний результат. Якщо два однакові агрегати працюють паралельно, навантаження між ними повинно розподілятися приблизно рівномірно. Значний дисбаланс може бути спричинений неоднаковими положеннями перемикачів відгалужень, різним опором приєднувальних ліній, порушеннями контактних з’єднань або нерівномірним підключенням споживачів.

Крім оптимізації кількості працюючих трансформаторів, зменшенню втрат сприятимуть компенсація реактивної потужності, рівномірний розподіл однофазних навантажень, контроль якості напруги та скорочення роботи обладнання на холостому ходу. Особливу увагу доцільно приділити секції, яка живиться від Т22, оскільки саме вона формує найбільшу частку активних і реактивних втрат.

Таким чином, результати розрахунку підтверджують наявність резерву підвищення енергоефективності підстанції. Основними напрямами є виведення малозавантаженого трансформатора в оперативний резерв, перерозподіл споживачів, вирівнювання навантаження та компенсація реактивної потужності. Остаточне рішення має прийматися після аналізу добових графіків навантаження і перевірки надійності електропостачання.

Розрахуємо коефіцієнт завантаження трансформатора T_{22} після підключення споживачів від інших.

$$Кз = \frac{921420}{2500 \cdot 650 \cdot 0{,}8} = 0{,}711.$$

З розрахунку видно, що переведення субабонентів на трансформатор T_{22} - дає можливість виключити втрати активної енергії недовантаженого трансформаторів.

Розрахуємо втрати активної енергії яких вдалось уникнути:

$$\sum E = 5635+5733+5879=17247 \text{ кВт·год.}$$

Вартість цих втрат - 18626,76 грн. за місяць.

Розрахуємо час за який окупиться встановлення вакуумного вимикача.

$$Річна\ економія = 18626{,}76 \cdot 12 = 1257242 \text{ грн.}$$

Економія від даного заходу складе 1,257 млн. грн. на рік.

2.2 Зміна режиму роботи механізму підйому вантажу

У цеху гарячої прокатки для переміщення металу, рулонів, валків, деталей обладнання та інших вантажів використовуються мостові крани, талі й допоміжні підйомні механізми. Їх робота безпосередньо пов’язана з виконанням основних і ремонтних технологічних операцій, тому надійність електроприводів підйому впливає на продуктивність цеху, тривалість простоїв і безпеку персоналу.

Механізми підйому працюють у повторно-короткочасному режимі. Протягом одного робочого циклу відбуваються підйом вантажу, його утримання на заданій висоті, опускання, зупинка та повторний пуск. Навантаження електродвигуна при цьому постійно змінюється. Найбільша потужність потрібна під час розгону та підйому вантажу максимально допустимої маси, тоді як під час переміщення порожнього вантажозахоплювального пристрою двигун працює зі значно меншим навантаженням. Частину часу механізм перебуває в стані очікування, але окремі елементи електроприводу та системи керування можуть залишатися ввімкненими.

У наявному режимі швидкість підйому часто залишається незмінною незалежно від фактичної маси вантажу, необхідної точності позиціонування та характеру технологічної операції. Такий режим не завжди є раціональним. Під час переміщення легких вантажів або виконання монтажних операцій робота електродвигуна з номінальною швидкістю може спричиняти зайві механічні удари, підвищене навантаження на редуктор, канати, гальмівну систему та металеві конструкції крана. Крім того, прямі пуски двигунів супроводжуються значними пусковими струмами, які створюють додаткові втрати в електричній мережі та викликають короткочасні зниження напруги.

Статична потужність електроприводу механізму підйому визначається масою вантажу, масою вантажозахоплювального пристрою, швидкістю вертикального переміщення та коефіцієнтом корисної дії механічної передачі. У розрахунковому режимі необхідно враховувати найбільшу допустиму масу вантажу та максимальну швидкість підйому. Замість поняття «найбільший натяг смуги», яке стосується переважно прокатних і мотальних механізмів, для підйомного обладнання коректніше використовувати поняття максимального вантажного зусилля або номінальної вантажопідйомності.

Під час підйому електродвигун повинен подолати силу тяжіння вантажу, втрати на тертя у підшипниках, редукторі, барабані та канатній системі, а також динамічні навантаження, що виникають у момент розгону. Під час опускання

вантажу характер роботи електроприводу змінюється. Потенціальна енергія вантажу може створювати обертальний момент у напрямку руху, унаслідок чого двигун переходить у гальмівний або генераторний режим. За відсутності рекуперації ця енергія розсіюється у гальмівних опорах або механічних гальмах і не використовується повторно.

Зміна режиму роботи механізму підйому передбачає насамперед упровадження частотно-регульованого електроприводу. Частотний перетворювач забезпечує плавний пуск і зупинку двигуна, регулювання швидкості та обмеження пускових струмів. Швидкість підйому може встановлюватися залежно від маси вантажу і вимог до точності операції. Під час переміщення легкого вантажу допускається підвищена швидкість, а під час роботи з важкими або відповідальними вантажами — знижена швидкість із плавним розгоном і точним позиціонуванням.

Плавне керування зменшує ударні навантаження на канати, барабани, муфти, редуктори та металеві конструкції. У результаті знижується інтенсивність зношування обладнання, скорочується кількість аварійних зупинок і збільшується міжремонтний період. Одночасно покращуються умови роботи оператора, оскільки вантаж переміщується без різких ривків і розгойдування.

Для підвищення енергоефективності доцільно передбачити автоматичний перехід електроприводу в режим очікування після завершення операції. Якщо механізм протягом установленого часу не використовується, допоміжні системи можуть бути відключені або переведені в режим зниженого споживання. Повторне ввімкнення здійснюється після команди оператора без тривалої затримки.

Додатковий ефект може бути отриманий завдяки використанню рекуперативного гальмування. Під час опускання важкого вантажу електродвигун працює як генератор, а вироблена електроенергія повертається до внутрішньої мережі цеху або використовується іншими електроприймачами.

Доцільність такого рішення залежить від кількості робочих циклів, середньої маси вантажів, висоти підйому та вартості рекуперативного перетворювача.

Система керування також повинна забезпечувати захист від перевантаження, перевищення допустимої швидкості, одночасного ввімкнення протилежних напрямків руху та виходу механізму за встановлені межі. Для цього використовуються кінцеві вимикачі, датчики положення, контролери навантаження, гальмівні пристрої та системи контролю стану канатів. За перевищення допустимої маси вантажу підйом має автоматично блокуватися.

Отже, зміна режиму роботи підйомних механізмів повинна бути спрямована на узгодження швидкості та потужності електроприводу з фактичним навантаженням. Застосування частотно-регульованого приводу, плавного пуску, автоматичного режиму очікування та рекуперативного гальмування дозволить скоротити пускові струми й непродуктивне електроспоживання, підвищити точність позиціонування вантажів і зменшити механічне зношування обладнання.

У цеху гарячої прокатки наявні механізму підйому вантажу. Необхідна Зміна режиму їх роботи .

Статична потужність електроприводу механізму підйому вантажу при максимальній швидкості і найбільшому натягу смуги може бути розрахована за формулою:

$$P_{cm} = \frac{T_{\max} \cdot V_{\max} \cdot \eta}{102}, \qquad (2.16)$$

де $T_{\max}$ - максимальний натяг смуги,

$V_{\max}$ - максимальна швидкість,

η - ККД редуктора.

Звідси,

$$P_{ст} = \frac{3100 \cdot 200,9}{102} = 546 \text{ кВт.}$$

У розрахунку на один двигун це становить 546кВт.

Враховуючи дію динамічної потужності коефіцієнтом запасу який для дводвигуновому системи прийнятий рівним 1,1, маємо:

$$P = K_д \cdot P_{ст}. \tag{2.17}$$

Отже,

$$P = 1,1 \cdot 547 = 603 \text{кВт} .$$

На механізмі підйому вантажу встановлено 2 двигуна П2ПМ-500-141-4У3 по 315 кВт згідно каталогу на електричні машини.

Електропривод механізму підйому вантажу оснащений двигуном номінальною потужністю 315 кВт. За фактичних умов експлуатації двигун працює не з повним навантаженням, а приблизно на 50% від номінальної потужності. Це означає, що в усталеному робочому режимі його споживана активна потужність приймається на рівні близько 160 кВт. У разі безперервної роботи протягом однієї години відповідне споживання електричної енергії становитиме близько 160 кВт·год. Тому під час подальших розрахунків необхідно розрізняти потужність двигуна, що вимірюється в кіловатах, і кількість спожитої електроенергії, яка визначається в кіловат-годинах.

Коефіцієнт корисної дії електродвигуна в розглянутому режимі прийнято рівним 0,95. Отже, приблизно 95% електричної потужності, яка надходить до двигуна, перетворюється на корисну механічну потужність на його валу, а решта 5% витрачається на покриття електричних, магнітних і механічних втрат. За споживаної потужності 160 кВт корисна механічна потужність становить орієнтовно 152 кВт, тоді як внутрішні втрати двигуна дорівнюють приблизно 8 кВт.

Після зміни режиму роботи механізму підйому вантажу електродвигун продовжуватиме працювати із середнім завантаженням близько 50%. Розрахункова споживана потужність при цьому також приймається рівною 160 кВт, а коефіцієнт корисної дії — 0,95. Збереження такого рівня завантаження пояснюється тим, що запропонована зміна режиму роботи не передбачає заміни двигуна або збільшення маси вантажу. Основний ефект досягається завдяки раціональнішому керуванню механізмом, скороченню тривалості роботи на холостому ходу, зменшенню кількості необґрунтованих пусків і вибору швидкості відповідно до фактичного характеру технологічної операції.

При цьому незмінність потужності в робочому режимі не означає відсутності енергетичного ефекту. Економія електроенергії утворюється переважно внаслідок скорочення загального часу роботи двигуна, усунення непродуктивних пауз і своєчасного переведення механізму в режим очікування. Наприклад, якщо після завершення підйомно-транспортної операції двигун раніше залишався ввімкненим, автоматичне відключення або зниження швидкості допоміжних механізмів дозволить скоротити сумарне місячне споживання електроенергії без зменшення продуктивності цеху.

Важливе значення має також застосування плавного пуску та регулювання швидкості. Під час прямого пуску двигуна виникають значні пускові струми, які спричиняють додаткові втрати в електричній мережі, нагрівання обмоток і короткочасне зниження напруги. Керований розгін дозволяє обмежити максимальний струм, знизити ударні навантаження на редуктор, барабан, канати та гальмівну систему. У результаті підвищується надійність механізму та зменшуються витрати на його технічне обслуговування.

Завантаження двигуна на рівні 50% є допустимим, проте воно потребує додаткового аналізу. Необхідно перевірити фактичні струми, момент опору, масу вантажів, тривалість робочого циклу та коефіцієнт потужності. Якщо встановлена потужність двигуна систематично значно перевищує потребу механізму, може бути доцільним застосування двигуна меншої номінальної

потужності. Водночас така заміна допускається лише після перевірки пускових, максимальних і аварійних навантажень, оскільки механізм повинен зберігати можливість безпечно підіймати вантаж максимально допустимої маси.

Таким чином, у розрахунковому режимі двигун потужністю 315 кВт працює із завантаженням близько 50% та споживає приблизно 160 кВт активної потужності. За коефіцієнта корисної дії 0,95 корисна механічна потужність на валу становить близько 152 кВт. Після зміни режиму роботи основні енергетичні параметри двигуна залишаються незмінними, однак скорочення непродуктивного часу, впровадження керованого пуску та оптимізація тривалості робочих циклів дозволяють зменшити загальні витрати електроенергії механізмом підйому вантажу.

Втрати потужності електродвигуна 315 кВт на нагрів, втрати в сталі, втрати від намагнічування складають:

$$\Delta P = \frac{P}{\eta} - P, \tag{2.18}$$

де Р – потужність двигуна,

η - ККД двигуна.

$$\Delta P_1 = \frac{315}{0,95} - 315 = 16,57\,\text{кВт}.$$

Втрати потужності при потужності 160 кВт на нагрів, втрати в сталі, втрати від намагнічування складають:

$$\Delta P_2 = \frac{160}{0,95} - 160 = 8,42\,\text{кВт}.$$

Різниця втрат становить:

$$\Delta p = \Delta P_1 - \Delta P_{2,} \tag{2.19}$$

де ΔP_1, ΔP_2 - втрати потужності електродвигуна на нагрів, втрати в сталі, втрати від намагнічування для двигуна при 315 та 160 кВт відповідно.

$$\Delta p = 16{,}57\text{-}8{,}42 = 8{,}14 \text{ кВт.}$$

Річна економія електроенергії складе:

$$E_w = \Delta p \cdot t, \tag{2.20}$$

де Δp - різниця втрат,

t – час роботи двигунів за рік.

Отже, річна економія складатиме:

$$E_w = 8{,}42 \cdot 8300 = 488756 \text{ кВт год.}$$

Характеристики двигуна [12].

Для модернізації електропривода механізму підйому вантажу обрано трифазний асинхронний електродвигун AIP355S6 із короткозамкненим ротором. Як українського виробника та постачальника обладнання в роботі доцільно зазначити Промислову компанію «СИСТЕМАКС», Україна. На офіційній сторінці компанії модель AIP 355 S6 потужністю 160 кВт і частотою обертання 1000 об/хв представлена як електродвигун виробництва ПК «СИСТЕМАКС». Компанія також зазначає українське виробництво трифазних низьковольтних електродвигунів.

Електродвигун AIP355S6 належить до серії загальнопромислових машин змінного струму. Завдяки простій конструкції, відсутності ковзних контактів і

короткозамкненому ротору він характеризується достатньою надійністю, відносно нескладним технічним обслуговуванням та придатністю до експлуатації в умовах промислового підприємства.

Номінальна потужність двигуна становить 160 кВт, а синхронна частота обертання — 1000 об/хв. Двигун розрахований на підключення до трифазної мережі напругою 380/660 В. Залежно від напруги живлення обмотки статора можуть з’єднуватися за схемою «трикутник» або «зірка». Така можливість забезпечує сумісність електричної машини з поширеними системами внутрішньоцехового електропостачання.

Висота осі обертання двигуна становить 355 мм, що відповідає його габариту. За прийнятими у роботі паспортними даними діаметр вихідного кінця валу дорівнює 75 мм. Габаритні розміри електричної машини становлять: довжина — 1560 мм, висота — 1010 мм, діаметр корпусу — близько 800 мм. Монтажне виконання передбачає встановлення двигуна на лапах, що спрощує його закріплення на фундаментній рамі та з’єднання з механічною передачею підйомного механізму.

Двигун призначений для експлуатації у тривалому режимі S1. У цьому режимі електрична машина може працювати протягом тривалого часу за відносно постійного навантаження, поки температура її основних елементів не досягне усталеного значення. Водночас під час використання двигуна у складі механізму підйому необхідно враховувати фактичну циклічність роботи, кількість пусків, тривалість пауз і можливі короткочасні перевантаження.

Ступінь захисту корпусу IP55 передбачає захист внутрішніх частин двигуна від пилу та водяних струменів. Це має особливе значення для прокатного цеху, де обладнання експлуатується за підвищеної запиленості, вологості та наявності технологічних забруднень. У каталозі українського постачальника для цієї моделі також зазначені потужність 160 кВт, частота обертання 1000 об/хв і виконання IP55.

Обмотки статора мають ізоляцію класу F. У розрахунках граничну температуру нагрівання прийнято на рівні 150 °C. Охолодження

електродвигуна здійснюється повітряним способом. Циркуляція повітря забезпечує відведення теплоти, яка утворюється в обмотках, магнітопроводі, підшипниках та інших елементах машини.

Коефіцієнт потужності електродвигуна становить 0,88, що є прийнятним значенням для асинхронної машини такої потужності. Коефіцієнт корисної дії у розрахунках прийнято рівним 0,95, тобто не менше 95%. У торговельній документації для моделі AIP355S6 наводиться ККД не менше 94,7%, тому використане в роботі значення 0,95 можна розглядати як його округлення.

Основні характеристики обраного двигуна:

виробник — ПК «СИСТЕМАКС»;

країна виробника — Україна;

тип — трифазний асинхронний двигун із короткозамкненим ротором;

номінальна потужність — 160 кВт;

напруга живлення — 380/660 В;

частота обертання — 1000 об/хв;

коефіцієнт потужності — 0,88;

коефіцієнт корисної дії — не менше 95%;

режим роботи — S1;

ступінь захисту — IP55;

клас ізоляції — F;

система охолодження — повітряна;

монтажне виконання — на лапах;

висота осі обертання — 355 мм;

діаметр валу — 75 мм;

габаритні розміри — 1560 × 1010 × 800 мм.

Застосування двигуна потужністю 160 кВт замість експлуатації електричної машини потужністю 315 кВт із постійним завантаженням близько 50% дозволить краще узгодити номінальні параметри електропривода з фактичною потребою механізму. Це сприятиме зменшенню втрат у двигуні,

підвищенню коефіцієнта його завантаження, скороченню споживання реактивної потужності та раціональнішому використанню електричної енергії.

За результатами виконаних розрахунків зміна режиму роботи механізму підйому вантажу та застосування двигуна відповідної потужності забезпечать підприємству додаткову економію приблизно 0,762 млн грн на рік. Крім безпосереднього економічного ефекту, очікується зниження навантаження на систему електропостачання, зменшення нагрівання кабельних ліній і комутаційної апаратури, а також підвищення надійності роботи підйомного механізму.

Тобто, зміна режиму роботи механізму підйому вантажу дозволить додатково економити підприємству близько 0,762 млн. грн/рік

2.3 Упровадження графіків вмикання та вимикання систем освітлення, вентиляції й повітряно-теплових завіс

Значна частина електроспоживання виробничого цеху припадає не лише на основне технологічне обладнання, а й на допоміжні системи, до яких належать освітлювальні установки, припливно-витяжна вентиляція, місцеві відсмоктувачі, системи кондиціювання та повітряно-теплові завіси. На відміну від прокатних станів і підйомних механізмів, робота яких безпосередньо залежить від виконання технологічних операцій, допоміжне обладнання нерідко залишається ввімкненим протягом усієї зміни або навіть цілодобово, незалежно від фактичної потреби. Це спричиняє непродуктивне споживання електричної й теплової енергії та збільшує експлуатаційні витрати підприємства.

У цеху гарячої прокатки постійна робота допоміжних систем частково пояснюється особливими умовами виробництва. Значні габарити приміщення, підвищена температура, наявність пилу, окалини, водяної пари та продуктів

згоряння потребують забезпечення нормативного повітрообміну й достатнього рівня освітленості. Водночас інтенсивність роботи окремих виробничих дільниць протягом доби є неоднаковою. Частина зон використовується лише під час виконання певних операцій, проведення ремонтів або переміщення персоналу. Тому одночасна робота всіх освітлювальних, вентиляційних і теплових установок із номінальною потужністю не завжди є обґрунтованою.

Запропонований захід полягає у складанні та впровадженні графіків вмикання і вимикання допоміжного обладнання відповідно до режиму роботи цеху. Графіки мають ураховувати початок і завершення виробничих змін, тривалість технологічних операцій, регламентовані перерви, ремонтні простої, сезонні зміни температури, фактичну присутність персоналу та рівень природного освітлення. Це дозволить забезпечити роботу обладнання лише в періоди, коли воно дійсно необхідне для підтримання технологічних і санітарних умов.

Для систем освітлення доцільно передбачити зональне керування. Виробниче приміщення необхідно розділити на окремі ділянки, кожна з яких матиме незалежне керування освітлювальними установками. Постійно освітлюватися повинні робочі місця, проходи, евакуаційні шляхи, небезпечні зони, пульти керування та ділянки з безперервним технологічним процесом. Освітлення складських, ремонтних і допоміжних приміщень може вмикатися лише під час перебування в них працівників.

У денний час інтенсивність штучного освітлення доцільно зменшувати з урахуванням надходження природного світла через вікна, світлові ліхтарі та інші світлопрозорі конструкції. Для цього можуть застосовуватися датчики освітленості, які автоматично вмикають або вимикають окремі групи світильників залежно від фактичного рівня освітлення. У побутових, адміністративних, складських та інших приміщеннях із періодичним перебуванням людей доцільно встановлювати датчики руху або присутності.

Організаційний графік освітлення має передбачати його ввімкнення незадовго до початку зміни та поетапне вимкнення після завершення роботи.

Після закінчення зміни повинно залишатися лише чергове, охоронне та аварійне освітлення. Відповідальні працівники мають контролювати відсутність необґрунтовано ввімкнених світильників у зонах, де виробничий процес тимчасово не здійснюється.

Додаткове скорочення споживання електроенергії може бути отримане внаслідок поступової заміни застарілих джерел світла світлодіодними світильниками. Вони характеризуються нижчою встановленою потужністю, тривалим строком експлуатації та можливістю автоматичного регулювання світлового потоку. Водночас заміна світильників повинна супроводжуватися перевіркою відповідності освітленості робочих поверхонь нормативним вимогам.

Режим роботи загальнообмінної вентиляції необхідно пов’язати з виробничим графіком і фактичним станом повітря в цеху. Постійна робота вентиляторів із номінальною продуктивністю призводить не лише до значного електроспоживання, а й до додаткових теплових втрат у холодний період року. Разом із видаленим повітрям із приміщення втрачається теплота, для компенсації якої необхідно збільшувати потужність систем опалення та повітряно-теплових завіс.

Повністю вимикати вентиляцію під час технологічного процесу не завжди допустимо, оскільки це може призвести до перевищення нормативної концентрації пилу, газів, аерозолів і надлишкової теплоти. Тому графіки повинні передбачати не лише повне вмикання або вимикання, а й перехід між кількома рівнями продуктивності. Під час інтенсивної роботи обладнання вентиляційні установки працюватимуть із номінальною продуктивністю, а в періоди технологічних пауз — у зниженому режимі.

Найбільш ефективним рішенням є застосування частотно-регульованих електроприводів вентиляторів. Частотний перетворювач дозволяє плавно змінювати частоту обертання двигуна відповідно до фактичної потреби у повітрообміні. Керування може здійснюватися за сигналами датчиків температури, запиленості, концентрації шкідливих речовин або перепаду тиску.

Це забезпечує автоматичне підтримання необхідних параметрів повітря без постійної роботи системи з максимальною продуктивністю.

Місцеві витяжні установки доцільно блокувати з роботою конкретного технологічного обладнання. Після запуску прокатного агрегату, печі або іншого джерела забруднення відповідний витяжний вентилятор повинен автоматично вмикатися. Після зупинення обладнання вентилятор може працювати протягом визначеного часу, необхідного для видалення залишкових забруднень, а потім вимикатися. Такий режим усуває тривалу роботу місцевих відсмоктувачів за відсутності виробничого навантаження.

Повітряно-теплові завіси використовуються переважно біля воріт і великих дверних отворів для зменшення проникнення холодного зовнішнього повітря. За відсутності автоматичного керування вони можуть працювати незалежно від положення воріт та температури навколишнього середовища. Це супроводжується непродуктивним споживанням електричної й теплової енергії.

Для підвищення ефективності теплові завіси необхідно обладнати кінцевими вимикачами або датчиками положення воріт. Завіса повинна автоматично вмикатися під час відкривання воріт і вимикатися після їх закриття із встановленою часовою затримкою. Інтенсивність її роботи доцільно регулювати залежно від зовнішньої температури, швидкості вітру, тривалості відкривання воріт і температури повітря всередині цеху.

У теплий період року нагрівальні елементи теплових завіс повинні бути вимкнені, якщо їхня робота не потрібна за умовами технології. В окремих випадках може залишатися лише повітряний режим, який перешкоджає потраплянню пилу та гарячого зовнішнього повітря. У холодний період потужність нагрівання необхідно змінювати залежно від фактичної температури, а не підтримувати постійно на максимальному рівні.

Реалізація запропонованого заходу може здійснюватися поетапно. На першому етапі необхідно провести інвентаризацію світильників, вентиляторів і теплових завіс, визначити їх установлену потужність, тривалість роботи та фактичну технологічну потребу. Після цього складаються добові, тижневі та

сезонні графіки роботи обладнання. На другому етапі призначаються відповідальні особи та впроваджується контроль виконання графіків. На завершальному етапі виконується автоматизація керування із застосуванням програмованих реле, таймерів, датчиків і частотних перетворювачів.

Ефективність заходу слід визначати шляхом порівняння тривалості роботи й обсягів електроспоживання до та після впровадження графіків. Окремо необхідно враховувати зменшення споживання теплової енергії завдяки раціональному використанню вентиляції та теплових завіс. Для достовірної оцінки бажано застосовувати автоматизований технічний облік електроенергії за кожною основною групою обладнання.

Під час упровадження графіків пріоритетними повинні залишатися безпека персоналу, нормативна освітленість і необхідна якість повітря. Енергозбереження не може досягатися шляхом вимкнення аварійного освітлення, вентиляції небезпечних зон або систем, безперервна робота яких передбачена вимогами технологічного процесу та охорони праці.

Отже, запровадження регламентованих графіків вмикання та вимикання систем освітлення, вентиляції й повітряно-теплових завіс є організаційно-технічним заходом, який не потребує масштабної реконструкції виробництва. Його реалізація дозволить скоротити тривалість непродуктивної роботи допоміжного обладнання, знизити пікове навантаження на систему електропостачання, зменшити втрати теплоти та витрати на технічне обслуговування. Найбільший результат може бути отриманий у разі поєднання графіків роботи з автоматичним керуванням, зональним освітленням, датчиками присутності, частотно-регульованими приводами та системою контролю енергоспоживання.

Введення графіків включення і відключення систем освітлення, вентиляції, теплових завіс в залежності від температури зовнішнього повітря призводить до економії електричної енергії 10-15%.

Споживання електричної енергії системами освітлення, вентиляції, тепловими завісами:

$$E = k_B \cdot P \cdot T \cdot n, \quad (2.21)$$

де n - кількість установок, шт

P - потужність установки, кВт

k_B - коефіцієнт використання

T - тривалість роботи установки, год/рік

$$E = 0{,}8 \cdot 30 \cdot 2500 \cdot 2 = 120000 \text{ кВт год/рік}$$

k_{ea} - коефіцієнт ефективності впровадження автоматичного керування

$k_{ea} = 1{,}1 - 1{,}5$

Економія електричної енергії:

$$\Delta E = E \cdot (k_{ea} - 1), \quad (2.22)$$

В таблиці 2.3 представлені зведені можливості енергозберігаючих заходів ЦГПТЛ ПАТ «Запоріжсталь»

Таблиця 2.3 – Можливості енергозбереження

№ з/п	Назва можливості з енергозбереження	Зміст запропонованого заходу	Річна економія електричної енергії, тис. кВт·год
1	Оптимізація роботи трансформаторної підстанції	Відключення одного з паралельно працюючих трансформаторів у періоди мінімального навантаження, зменшення втрат холостого ходу та підтримання оптимального коефіцієнта завантаження	0,805
2	Вирівнювання графіка електричних навантажень дільниці	Перенесення частини допоміжних операцій на години зниженого навантаження, обмеження одночасного пуску потужних електроприймачів	0,244
3	Зміна режиму роботи механізму підйому вантажу	Скорочення часу холостого ходу, оптимізація швидкості піднімання та опускання, застосування раціональної послідовності вантажних операцій	0,488
4	Упровадження графіків увімкнення і вимкнення систем освітлення, вентиляції та теплових завіс	Автоматичне відключення обладнання в неробочий час, застосування таймерів, датчиків руху, температури та освітленості	0,221

5	Компенсація реактивної потужності	Встановлення автоматичної конденсаторної установки для підвищення коефіцієнта потужності до 0,90–0,95 та зменшення струмів у мережі	0,356
6	Оптимізація роботи насосних агрегатів	Відключення надлишкових насосів, узгодження кількості працюючих агрегатів із фактичною витратою води та тиском у системі	0,412
7	Упровадження частотного регулювання насосів	Регулювання подачі води зміною частоти обертання двигунів замість дроселювання засувками	0,298
8	Раціоналізація роботи вентиляційних установок	Зменшення продуктивності вентиляторів у періоди зниженого теплового та технологічного навантаження	0,184
9	Скорочення холостого ходу рольгангів і транспортних механізмів	Автоматичне вимкнення секцій рольгангів за відсутності металу та їх послідовне ввімкнення перед надходженням заготовки	0,267
10	Оптимізація режимів роботи компресорного обладнання	Усунення роботи компресорів у режимі розвантаження, узгодження їх продуктивності з фактичним споживанням стисненого повітря	0,193
11	Усунення витоків стисненого повітря	Проведення ультразвукового контролю пневматичних мереж, ремонт з’єднань, арматури, шлангів і ущільнень	0,329
12	Заміна застарілих електродвигунів на енергоефективні	Установлення двигунів класу енергоефективності IE3 або IE4 під час планової заміни обладнання	0,276
13	Оптимізація режимів електроопалення допоміжних приміщень	Зниження температури в неробочі години, зональне опалення та автоматичне регулювання температури	0,148
14	Модернізація системи виробничого освітлення	Заміна традиційних світильників на LED, зонування освітлення та зниження освітленості на незадіяних ділянках	0,231
15	Упровадження автоматизованого технічного обліку електроенергії	Встановлення локальних лічильників на великих споживачах, оперативне виявлення перевитрат і відхилень від установлених режимів	0,314
16	Організація контролю пікового навантаження	Автоматичне обмеження другорядних споживачів у години максимуму, почерговий пуск електродвигунів і формування пріоритетів живлення	0,205
	Усього		4,971

За результатами розширеної оцінки найбільший потенціал економії має оптимізація роботи трансформаторної підстанції — 0,805 тис. кВт·год на рік, або близько 16,2% загальної розрахункової економії. Значний ефект також очікується від зміни режиму роботи вантажопідіймального механізму — 0,488 тис. кВт·год, оптимізації насосного обладнання — 0,412 тис. кВт·год, компенсації реактивної потужності — 0,356 тис. кВт·год, а також усунення витоків стисненого повітря — 0,329 тис. кВт·год.

Сумарний розрахунковий потенціал після впровадження всіх запропонованих заходів становить приблизно 4,971 тис. кВт·год електричної енергії на рік. Наведені значення є попередніми та повинні уточнюватися за

результатами інструментальних вимірювань, аналізу добових графіків навантаження, тривалості роботи обладнання та фактичного обсягу виробництва.

2.4 Розрахунок зниження витрати електричної енергії за рахунок вирівнювання графіку навантажень дільниці

Визначимо економію електричної енергії:

$$E_w = t \cdot P, \tag{2.23}$$

де t – час , роботи обладнання в місяць;

P – потужність працюючих двигунів.

Отже,

$$E_w = 331 \cdot 150 = 14950 \text{ кВт}.$$

Тобто, 14950 кВт на місяць, або 244871 кВт год на рік (рисунок 2.3, 2.4).

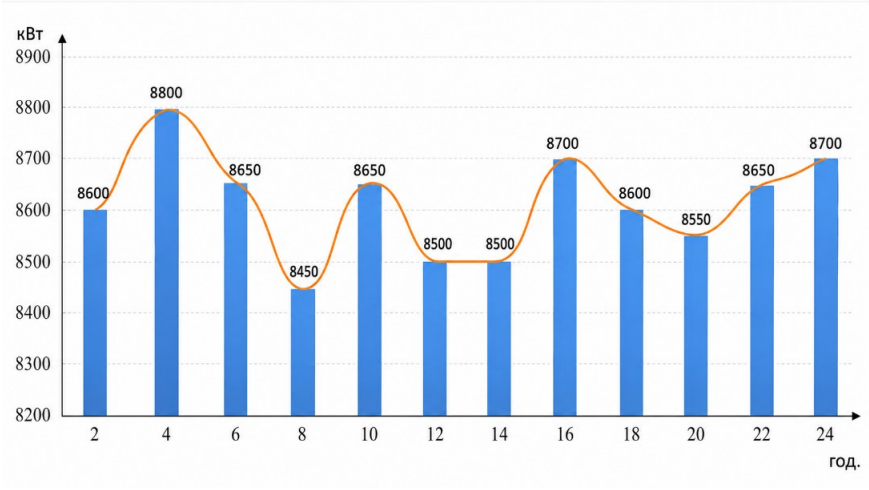


Рисунок 2.3 - Графік навантаження після впровадження заходів



Рисунок 2.4 - Втрати в системі електропостачання до та після впровадження заходів

Перший графік відображає зміну активної потужності цеху протягом доби з інтервалом у дві години. Навантаження змінюється в межах від 8450 до 8800 кВт, тобто протягом доби споживана потужність перебуває на досить високому та відносно стабільному рівні. Середнє значення за наведеними точками становить приблизно 8612,5 кВт, або 8,61 МВт.

На початку розрахункового періоду, о 2:00, навантаження становить 8600 кВт. До 4:00 воно збільшується до максимального добового значення — 8800 кВт. Такий максимум може бути пов’язаний з одночасною роботою основного технологічного обладнання, вентиляційних установок, систем освітлення, насосів, теплових завіс та інших допоміжних електроприймачів. У разі збігу їхніх робочих циклів формується локальний максимум навантаження, який збільшує вимоги до трансформаторів, кабельних ліній і комутаційної апаратури.

Після 4:00 спостерігається поступове зниження потужності. О 6:00 вона становить 8650 кВт, а о 8:00 досягає мінімального значення — 8450 кВт. Зменшення навантаження на 350 кВт порівняно з добовим максимумом може пояснюватися технологічною паузою, завершенням окремих операцій, відключенням частини обладнання або переходом допоміжних систем у менш інтенсивний режим роботи.

О 10:00 навантаження знову збільшується до 8650 кВт, після чого о 12:00 та 14:00 знижується до 8500 кВт. Практично однакове значення протягом чотирьох годин свідчить про відносно сталий режим роботи обладнання в цей період. Імовірно, основні виробничі агрегати працюють без значних змін, а частина допоміжних механізмів перебуває у резерві або в режимі зниженої продуктивності.

Наступне зростання відбувається о 16:00, коли активна потужність досягає 8700 кВт. Після цього навантаження знижується до 8600 кВт о 18:00 та до 8550 кВт о 20:00. Наприкінці доби спостерігається повторне збільшення: о 22:00 потужність становить 8650 кВт, а о 24:00 — 8700 кВт. Отже, графік має кілька локальних максимумів, що свідчить про циклічність роботи виробничого обладнання та змінний характер технологічного процесу.

Різниця між максимальним і мінімальним значеннями становить лише 350 кВт, або близько 4% від добового максимуму. Це означає, що графік навантаження є досить рівномірним. Коефіцієнт заповнення графіка, визначений як співвідношення середньої та максимальної потужності, становить приблизно 0,979. Такий високий показник свідчить про тривалу роботу підприємства з навантаженням, близьким до максимального.

Водночас висока рівномірність графіка не обов’язково означає, що всі витрати електроенергії є технологічно обґрунтованими. Частина постійного навантаження може формуватися обладнанням, яке продовжує працювати під час технологічних пауз. До нього можуть належати вентилятори, насоси, освітлювальні установки та теплові завіси. Тому навіть за відносно рівного

графіка існує можливість зниження його базового рівня без порушення виробничого процесу.

Варто також враховувати особливість масштабу графіка. Вертикальна вісь починається не з нульового значення, а з 8200 кВт, через що коливання навантаження візуально здаються значнішими, ніж вони є насправді. Фактично потужність протягом доби змінюється у відносно вузькому діапазоні.

Якщо кожне представлене значення розглядати як середнє навантаження відповідного двогодинного інтервалу, орієнтовне добове споживання електричної енергії становитиме близько 206,7 МВт·год. Це розрахункова оцінка, яка має бути уточнена за даними автоматизованого погодинного обліку.

Аналіз зміни потужності після впровадження заходу

Другий графік характеризує зміну потужності досліджуваної групи електроприймачів до та після впровадження організаційно-технічного заходу. До його реалізації споживана потужність становила 412 кВт, а після реалізації знизилася до 209 кВт.

Абсолютне скорочення потужності становить 203 кВт. У відносному вираженні споживана потужність зменшується приблизно на 49,3%. Отже, після впровадження заходу обладнання споживає лише близько 50,7% від початкового рівня. Іншими словами, навантаження скорочується майже вдвічі.

Такий результат може бути досягнутий завдяки запровадженню графіків вмикання і вимикання систем освітлення, вентиляції та повітряно-теплових завіс. До впровадження графіків частина обладнання могла працювати незалежно від фактичної присутності персоналу, стану технологічного процесу, температури повітря або положення виробничих воріт. Після організації регламентованої роботи тривалість непродуктивного використання допоміжних систем суттєво скорочується.

Найбільш значний ефект може забезпечувати зональне керування освітленням. У цьому разі світильники працюють лише на тих ділянках, де перебуває персонал або виконується технологічна операція. У допоміжних

приміщеннях, ремонтних зонах і на тимчасово незадіяних ділянках освітлення може автоматично вимикатися.

Вентиляційні установки можуть переводитися на знижену продуктивність під час технологічних пауз. Застосування частотно-регульованого приводу дозволяє змінювати швидкість вентиляторів залежно від температури, запиленості й фактичної потреби у повітрообміні. Це є ефективнішим, ніж постійна робота вентиляторів із номінальною швидкістю.

Роботу повітряно-теплових завіс доцільно пов’язати з відкриванням воріт. Після їх закриття завіса повинна автоматично вимикатися із заданою затримкою. Завдяки цьому усувається її тривала робота в періоди, коли проникнення зовнішнього повітря відсутнє.

Зменшення потужності на 203 кВт становить приблизно 2,36% від середнього загальноцехового навантаження, наведеного на першому графіку. На перший погляд ця частка може здаватися незначною, однак для великого промислового об’єкта навіть таке скорочення забезпечує суттєву економію електричної енергії протягом року.

За умови постійного збереження різниці в 203 кВт теоретичне скорочення електроспоживання становитиме:

близько 4,87 МВт·год за добу;

приблизно 148 МВт·год за місяць;

близько 1,78 млн кВт·год за рік.

Ці значення є максимальною розрахунковою оцінкою для безперервної цілодобової роботи. Фактична економія залежатиме від кількості змін, тривалості роботи обладнання, сезонності використання теплових завіс та реального графіка виробництва.

Узагальнений висновок

Сумісний аналіз двох графіків показує, що загальне навантаження цеху протягом доби залишається відносно стабільним і коливається в межах 8,45–8,80 МВт. Водночас у його структурі наявна група допоміжних

електроприймачів, потужність яких може бути знижена з 412 до 209 кВт шляхом упорядкування режиму роботи.

Запропонований захід не потребує скорочення виробничої програми або відключення основного технологічного обладнання. Енергетичний ефект досягається за рахунок усунення непродуктивної роботи освітлення, вентиляції та теплових завіс. Унаслідок цього знижується базовий рівень навантаження, зменшуються втрати в трансформаторах і кабельних лініях та вивільняється частина потужності для підключення інших споживачів.

Отже, зменшення потужності допоміжних систем на 203 кВт, або на 49,3%, підтверджує доцільність упровадження автоматизованих графіків керування. Для підтвердження фактичного результату після реалізації заходу необхідно здійснювати окремий облік електроенергії до та після модернізації з урахуванням тривалості роботи, обсягів виробництва та температурних умов.

3 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ЗАХОДІВ ІЗ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ЦГПТЛ

3.1 Методичні засади оцінювання економічної ефективності енергозберігальних заходів

Питання енергозбереження та підвищення енергоефективності з кожним роком набувають дедалі більшої актуальності. Якщо раніше ця проблема розглядалася переважно на рівні державної енергетичної політики або великих промислових підприємств, то сьогодні вона викликає зацікавленість також у малого й середнього бізнесу, бюджетних установ і домогосподарств. Така тенденція пояснюється тим, що витрати на енергетичні ресурси безпосередньо впливають на собівартість продукції, рівень комунальних платежів, конкурентоспроможність підприємств і загальну стійкість економіки.

Необхідність економного використання паливно-енергетичних ресурсів зумовлена сукупністю взаємопов’язаних причин. Насамперед йдеться про обмеженість запасів традиційних видів палива та поступове ускладнення їх видобутку. Водночас для України особливого значення набуває проблема енергетичної безпеки, оскільки залежність від імпортованих енергоносіїв створює додаткові економічні, політичні та логістичні ризики.

Важливим чинником залишається висока енергоємність національної економіки. Для виробництва одиниці продукції українські підприємства в багатьох випадках витрачають більше палива, тепла й електроенергії, ніж сучасні модернізовані підприємства інших країн. Це знижує конкурентоспроможність вітчизняної продукції, збільшує навантаження на енергетичну інфраструктуру та погіршує екологічні показники.

Додатковим стимулом до впровадження енергозберігальних заходів є зростання вартості природного газу, нафтопродуктів, електричної енергії та інших ресурсів. Навіть незначне збільшення тарифів може суттєво впливати на фінансовий результат підприємств, у структурі собівартості яких енергетичні

витрати займають значну частку. Особливо це стосується металургійної, хімічної, гірничодобувної та машинобудівної промисловості.

Висока енергоємність окремих галузей економіки пояснюється низкою технічних, організаційних та фінансових причин. Однією з головних є значна частка витрат паливно-енергетичних ресурсів у загальній собівартості продукції. На енергоємних підприємствах витрати на природний газ, електроенергію, тепло, стиснене повітря та воду можуть формувати істотну частину поточних виробничих витрат.

Іншим важливим фактором є високий ступінь фізичного й морального зносу основних виробничих фондів. Для значної кількості промислових підприємств рівень зношеності обладнання традиційно оцінюється в межах 65–70%. Експлуатація застарілих електродвигунів, трансформаторів, насосів, компресорів, печей і систем регулювання супроводжується підвищеними втратами енергії, частими ремонтами та нестабільною роботою.

На ефективність енергоспоживання також негативно впливає недостатня поінформованість підприємств про сучасні програми підтримки, доступні технології та практичні результати впровадження енергоефективних рішень. В окремих випадках керівництво підприємства усвідомлює наявність перевитрат, але не має достовірних даних про їх джерела або не володіє методикою оцінювання економічного ефекту.

Суттєвою перешкодою залишається й обмежений досвід фінансування енергозберігальних проєктів. Такі проєкти часто потребують значних початкових вкладень, тоді як економічний результат формується поступово протягом декількох років. Відсутність доступного довгострокового кредитування, високі інвестиційні ризики та невизначеність щодо майбутніх тарифів уповільнюють реалізацію навіть економічно доцільних заходів.

Попри існуючі труднощі, великі промислові компанії України все активніше контролюють показники енергоспоживання, питомі витрати ресурсів та ефективність використання обладнання. Це пояснюється тим, що системна робота у сфері енергоефективності дозволяє одночасно скорочувати

собівартість продукції, підвищувати надійність виробництва та зменшувати негативний вплив на довкілля.

Одним із основних інструментів виявлення резервів економії є енергетичний аудит. Його проведення передбачає збір інформації про фактичне споживання ресурсів, аналіз графіків навантаження, оцінювання технічного стану обладнання та визначення непродуктивних втрат. На основі отриманих результатів формується перелік заходів із підвищення енергоефективності та виконується їх техніко-економічне обґрунтування.

Проведений енергетичний аудит досліджуваного виробничого підрозділу показав наявність значного потенціалу зниження енергетичних витрат. Було встановлено, що частина ресурсів витрачається не на безпосереднє виконання технологічних операцій, а на компенсацію втрат, роботу обладнання в режимах недовантаження, холостий хід і підтримання допоміжних систем.

Результати аналізу підтвердили, що інвестиції в енергоефективність можуть забезпечити не лише разове скорочення витрат, а довгострокове зменшення щорічних експлуатаційних платежів. За умови правильного вибору заходів економія зберігатиметься протягом усього строку служби модернізованого обладнання.

Під час аудиту було визначено основних споживачів природного газу та електричної енергії. Найбільші обсяги природного газу припадають на теплотехнологічні агрегати, зокрема ковпакові та нагрівальні печі. Їх енергоспоживання залежить від температурного режиму, тривалості нагрівання, завантаження, стану футерівки, роботи пальників і ефективності утилізації теплоти відхідних газів.

Основними споживачами електричної енергії є прокатні стани, насосні агрегати, вентилятори, компресори, рольганги, вантажопідіймальні механізми та системи освітлення. Особливу увагу було приділено режимам роботи потужних електроприводів, оскільки їх недовантаження, часті пуски та тривалий холостий хід призводять до додаткових втрат.

На основі даних вимірювань і розрахунків було встановлено фактичні обсяги споживання енергії окремими агрегатами. Це дозволило визначити ділянки з найбільшими питомими витратами та сформувати пріоритетний перелік енергозберігальних заходів.

До найбільш перспективних напрямів належать оптимізація роботи трансформаторних підстанцій, вирівнювання добового графіка навантаження, зміна режимів роботи механізмів підйому вантажу, автоматизація систем освітлення, вентиляції та теплових завіс. Окремий ефект може бути отриманий за рахунок компенсації реактивної потужності, частотного регулювання насосів і вентиляторів, усунення витоків стисненого повітря та скорочення холостого ходу обладнання.

На рисунку 3.1 наведено узагальнену схему або діаграму запропонованих заходів із зазначенням їх спрямованості. Частина заходів має організаційний характер і не потребує значних капіталовкладень. Інші передбачають модернізацію обладнання, встановлення автоматичних систем керування або заміну окремих агрегатів.



Запропоновані проєкти енергозбереження є відносно незалежними. Це означає, що їх можна реалізовувати як комплексно, так і окремими етапами залежно від фінансових можливостей підприємства, технічної готовності та пріоритетності конкретних напрямів.

Незалежність заходів створює можливість поетапного впровадження програми енергоефективності. На першому етапі можуть бути реалізовані маловитратні організаційні рішення, які мають короткий строк окупності. До них належать зміна графіків роботи обладнання, контроль холостого ходу, оптимізація кількості працюючих трансформаторів і впровадження оперативного енергетичного обліку.

На другому етапі доцільно здійснювати технічну модернізацію, що потребує більшого обсягу інвестицій. Це може бути встановлення частотних перетворювачів, автоматичних конденсаторних установок, датчиків руху й освітленості, енергоефективних електродвигунів та систем автоматичного керування.

Для кожного заходу необхідно визначити очікувану річну економію електричної енергії або природного газу, обсяг початкових інвестицій, експлуатаційні витрати та строк реалізації. Крім того, доцільно враховувати вплив заходу на надійність обладнання, якість продукції, умови праці та екологічні показники.

Результати розрахунку річної економії енергоресурсів від упровадження запропонованих заходів необхідно подати в таблиці 3.1. У ній слід указати назву кожного проєкту, вид ресурсу, що заощаджується, річний обсяг економії, вартісний ефект і, за можливості, необхідний розмір капіталовкладень.

Для підвищення достовірності розрахунків річна економія повинна визначатися з урахуванням фактичної тривалості роботи обладнання. Наприклад, якщо зниження потужності становить 20 кВт, а захід діє протягом 5000 год на рік, то економія електроенергії дорівнює:

$$\Delta W = 20 \cdot 5000 = 100000 \text{ кВт*год.}$$

При визначенні грошового ефекту необхідно використовувати тариф, за яким підприємство фактично оплачує спожиту електроенергію або природний газ. Якщо ціна електроенергії становить 6 грн/кВт·год, річний економічний ефект у наведеному прикладі дорівнюватиме:

$$E=100000\cdot6=600000 \text{ грн.}$$

Водночас валова економія не є остаточним фінансовим результатом. Із неї необхідно відняти додаткові витрати на технічне обслуговування, ремонт, перевірку обладнання та експлуатацію автоматизованих систем.

Для капіталомістких заходів доцільно визначати простий і дисконтований строки окупності. Простий строк окупності розраховується як відношення початкових інвестицій до річного чистого економічного ефекту. Якщо інвестиції становлять 1,8 млн грн, а річна економія після врахування витрат — 600 тис. грн, строк окупності дорівнює приблизно трьом рокам.

Крім строку окупності, для комплексного оцінювання слід використовувати показники чистої приведеної вартості, індексу прибутковості та внутрішньої норми дохідності. Їх застосування дозволяє врахувати зміну вартості грошей у часі та порівняти між собою проєкти з різним строком служби й обсягом інвестицій.

Не менш важливо виконати аналіз чутливості результатів. Економічна ефективність залежить від майбутнього тарифу на енергоресурси, фактичного завантаження обладнання та рівня досягнутої економії. Тому доцільно розглядати оптимістичний, базовий і песимістичний сценарії.

У базовому сценарії використовуються найбільш імовірні значення тарифів і тривалості роботи. Оптимістичний сценарій передбачає вищі ціни на енергію або більший обсяг економії, а песимістичний — менше завантаження обладнання та зростання витрат на реалізацію проєкту.

Запропоновані заходи мають оцінюватися не лише за прямим зниженням енергоспоживання. Важливими є також непрямі результати: зменшення аварійності, подовження ресурсу обладнання, скорочення ремонтних витрат, зниження пікових навантажень і поліпшення умов праці.

Таким чином, результати проведеного аудиту свідчать про наявність реального потенціалу підвищення енергоефективності виробничого підрозділу. Найбільші резерви пов’язані з удосконаленням режимів роботи основних і допоміжних агрегатів, автоматизацією керування та підвищенням якості енергетичного обліку.

Системна реалізація запропонованих заходів дасть змогу скоротити річне споживання енергоресурсів, знизити собівартість продукції та підвищити стійкість роботи підприємства. Остаточний вибір пріоритетних проєктів повинен здійснюватися на основі їх технічної реалізованості, обсягу інвестицій, строку окупності та сумарного економічного ефекту.

Таблиця 3.1 – Економія енергоресурсів за рік від впровадження заходів

Заходи	Одиниці вимірювання	Економія
1. Оптимізація роботи трансформаторної підстанції	кВт·год/рік	0,805128205
2. Вирівнювання графіку навантажень дільниці	кВт·год/рік	0,244871795
3. Зміна режиму роботи механізму підйому вантажу	кВт·год/рік	0,488461538
4. Введення графіків включення і відключення систем освітлення, вентиляції, теплових завіс	кВт·год/рік	0,221153846
Всього	кВт·год/рік	1,759615385

Наведемо методику оцінки ефективності заходів [9].

Економічний ефект заходів визначається за рахунок зменшення споживання електроенергії.

Розраховуємо економічний ефект:

$$E = E_{W,Q} \cdot тариф, \tag{3.1}$$

де E_W *або* E_Q – економія електроенергії;

тариф – тариф на електроенергію 1,56 грн./кВт·год.

Визначаємо період простої окупності проекту – це найбільш простий метод оцінки проекту, при котрому розраховується період часу, протягом якого, вигоди від проекту будуть рівними витратам на проект, років:

$$T = \frac{K}{E}, \tag{3.2}$$

де K – капітальні витрати, тис.грн;

E – економічний ефект, тис.грн.

Чиста теперішня вартість проекту (NPV) – це сумарна сьогоднішня вартість чистих грошових потоків або різниця між дисконтова ними сумарними доходами та сумарними дисконтова ними витратами. Для розрахунку NPV проекту необхідно визначити ставку дисконту, використати її для дисконтування потоків витрат та вигод і підсумувати. В економічному аналізі ставка дисконту являє собою закладену вартість капіталу, тобто прибуток, який міг би бути одержаний при інвестуванні найприбутковіших альтернативних проектів. Якщо ЧТВ позитивна, то проект можна рекомендувати для фінансування. Якщо ЧТВ дорівнює нулю, то надходжень від проекту вистачить лише для відновлення вкладеного капіталу. Якщо ЧТВ менше нуля – проект не приймається.

$$NPV = \sum_{t=0}^{T} \frac{(B_t - C_t)}{(1+\alpha)^t}, \quad (3.3)$$

де *Bt-Ct* – чистий грошовий потік;

α - ставка дисконту. Для проектів енергоефективності приймається рівною 10%;

t – життєвий цикл проекту, років.

Метод розрахунку чистої теперішньої вартості полягає у порівнянні величини початкових інвестицій з загальною сумою дисконтованих чистих грошових надходжень, які генеруються ними протягом прогнозованого строку.

Визначення NPV від реалізації проекту проведемо в таблицях за формулами:

Балансовий прибуток:

$$БП = Е_{ПЕР} – ЕВ \ – Ам \ , \quad (3.4)$$

де *ЕВ* – експлуатаційні витрати, тис.грн.;

Ам – амортизаційні витрати, тис.грн.

Амортизація:

$$Ам = К/t \ , \quad (3.5)$$

де *К* – капітальні витрати, тис.грн.

Чистий прибуток:

$$ЧП = БП – ПнП \ , \quad (3.6)$$

де *ПнП* – податок на прибуток, тис.грн.,

$$ПнП = БП \cdot Р, \quad (3.7)$$

де P – ставка податку.

Ставка податок складає 18% від балансового прибутку ЧГП (суми чистого прибутку та амортизації обладнання).

Дисконтований грошовий потік (ДГП) знаходимо за формулою:

$$ДГП = ЧГП \cdot К_Д \tag{3.8}$$

Кумулятивний грошовий потік (КГП) знаходимо як суму *КГП* попереднього року та *ДГП* даного року.

За допомогою розрахованих даних знаходимо значення NPV.

Внутрішня норма рентабельності (IRR) – це рівень ставки дисконтування, при якому NPV проекту за його життєвий цикл дорівнює нулю. ВНР проекту дорівнює ставці дисконту, при якій сумарні дисконтоваі вигоди дорівнюють сумарним дисконтовим витратам, тобто ВНР є ставкою дисконту, при якій NPV проекту дорівнює нулю .

Для розрахунку за даною формулою необхідно підібрати таку ставку дисконтування, щоб NPV при цій ставці була від'ємна.

$$IRR = \alpha_1 + \frac{NPV_1 \cdot (\alpha_2 - \alpha_1)}{(NPV_1 - NPV_2)} \tag{3.9}$$

де α_1 – ставка дисконту, при якій ЧТВ позитивна;

α_2 – ставка дисконту, при якій ЧТВ – від'ємна;

NPV_1 – величина позитивної ЧТВ при ставці дисконту α_1;

NPV_2 – величина від'ємної ЧТВ при ставці дисконту α_2.

Індекс доходності або ануїтет NPV визначається за формулою:

$$PI = \frac{NPV + K}{K} \tag{3.10}$$

Дисконтований термін окупності (PBP) визначається графічно, знаходиться як перетин лінії кумулятивного дисконтованого грошового потоку з віссю X, але проводити за даним показником оцінку не будемо.

Надалі проводимо розрахунки ефективності заходів за даною методикою.

3.2 Загальний комплексний проект

Зводимо показники ефективності всіх проектів в таблиці 3.2 та на рисунку 3.1:

Таблиця 3.2 – Показники ефективності проєктів

№ з/п	Назва можливості з енергозбереження	Річна економія електричної енергії, тис. кВт·год	Економія за рахунок енергозберігальних заходів, млн грн
1	Оптимізація роботи трансформаторної підстанції	0,966	1,507
2	Вирівнювання графіка навантажень дільниці	0,293	0,458
3	Зміна режиму роботи механізму підйому вантажу	0,586	0,914
4	Упровадження графіків увімкнення і вимкнення систем освітлення, вентиляції та теплових завіс	0,265	0,414
	Усього	2,111	3,294

Проаналізуємо отримані показники ефективності всіх проектів. Строки окупності знаходяться в межах доцільності впровадження енергозберігаючих проектів. Всі проекти мають великий ступінь ефективності, їх чиста теперішня вартість має велике додатне значення та внутрішня норма рентабельності складає великий відсоток.

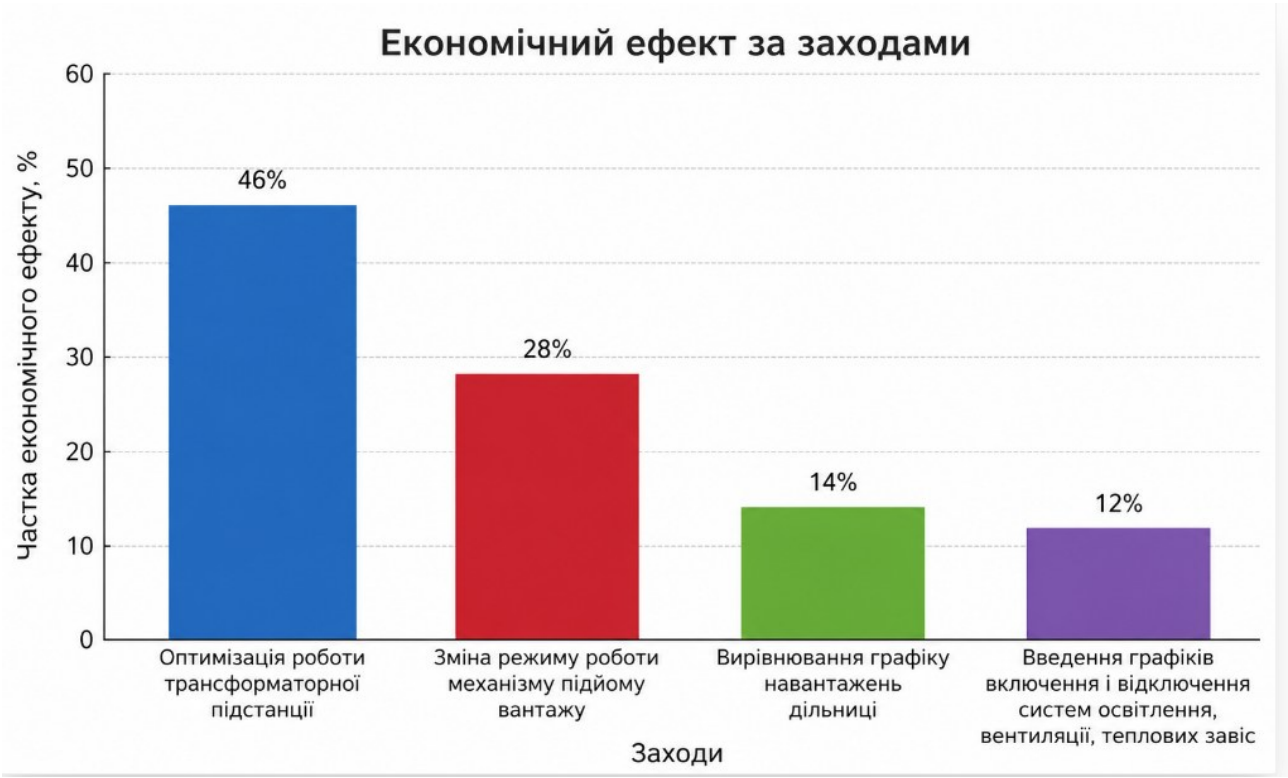


Рисунок 3.1 - Економічний ефект за заходами

Наведена діаграма відображає розподіл загального економічного ефекту між чотирма заходами, спрямованими на підвищення енергоефективності виробничої дільниці. Сума всіх представлених часток становить 100%, тому графік дає змогу визначити внесок кожного рішення у загальний результат і встановити пріоритетність їх реалізації.

Найбільшу частку економічного ефекту забезпечує оптимізація роботи трансформаторної підстанції — 46%. Майже половина очікуваної економії пов’язана з вибором раціональної кількості трансформаторів, що одночасно перебувають у роботі, та переведенням малозавантаженого обладнання в резерв. За чинної схеми декілька трансформаторів можуть тривалий час працювати з низьким коефіцієнтом завантаження, але при цьому в кожному з них зберігаються постійні втрати холостого ходу. Перерозподіл навантаження між меншою кількістю працюючих агрегатів дозволяє скоротити ці втрати та підвищити ефективність використання встановленої потужності підстанції.

Частка цього заходу перевищує результат від зміни режиму роботи механізму підйому вантажу на 18 відсоткових пунктів. Порівняно з

вирівнюванням графіка навантаження його внесок більший приблизно у 3,3 раза, а порівняно з упровадженням графіків роботи допоміжних систем — майже у 3,8 раза. Отже, оптимізацію трансформаторної підстанції доцільно розглядати як основний напрям скорочення енергетичних витрат.

Другим за результативністю заходом є зміна режиму роботи механізму підйому вантажу, на яку припадає 28% загального економічного ефекту. Економія в цьому випадку формується внаслідок узгодження потужності електродвигуна з фактичним навантаженням механізму, скорочення роботи на холостому ходу, зменшення кількості необґрунтованих пусків і застосування раціонального режиму керування. Заміна двигуна завищеної потужності на агрегат, параметри якого відповідають реальній потребі механізму, дозволяє підвищити коефіцієнт його завантаження та скоротити активні й реактивні втрати.

Сукупний внесок оптимізації трансформаторної підстанції та зміни режиму роботи підйомного механізму становить 74% загального економічного результату. Це означає, що майже три чверті очікуваної економії забезпечуються двома технічними заходами, безпосередньо пов’язаними з основним силовим електрообладнанням. Саме ці рішення повинні отримати першочергове технічне та фінансове обґрунтування.

Вирівнювання графіка навантаження дільниці забезпечує 14% економічного ефекту. Цей захід передбачає рознесення в часі запусків потужних електроприймачів, узгодження роботи технологічного та допоміжного обладнання, а також перенесення окремих операцій за межі періодів максимального навантаження. Його реалізація дозволяє зменшити пікову потужність, розвантажити трансформатори й кабельні лінії та скоротити втрати електроенергії у внутрішній системі електропостачання.

Хоча частка вирівнювання графіка є меншою порівняно з двома основними технічними заходами, його перевагою є відносно невелика потреба у капітальних вкладеннях. У багатьох випадках необхідний результат може бути отриманий шляхом удосконалення виробничого планування,

диспетчеризації та автоматизованого контролю навантаження. Тому цей напрям характеризується сприятливим співвідношенням між витратами на впровадження та отриманою економією.

Найменший, але також вагомий внесок забезпечує введення графіків вмикання і вимикання систем освітлення, вентиляції та повітряно-теплових завіс — 12%. Економія досягається шляхом скорочення непродуктивної роботи допоміжного обладнання, зонального керування освітленням, автоматичного вимикання вентиляторів у періоди технологічних пауз і блокування теплових завіс із положенням виробничих воріт.

Цей захід має найменшу частку в загальній структурі, проте вирізняється простотою реалізації та відносно невеликими капітальними витратами. Для його впровадження можуть використовуватися програмовані реле, таймери, датчики присутності, освітленості, температури та положення воріт. Отримана економія не супроводжується зменшенням виробничої програми, оскільки скорочується лише тривалість необґрунтованої роботи допоміжних систем.

Разом заходи з вирівнювання графіка навантаження та регламентування роботи допоміжних систем формують 26% загального економічного ефекту. Вони мають переважно режимний та організаційний характер і можуть реалізовуватися паралельно з технічною модернізацією основного обладнання.

Таким чином, діаграма показує, що найбільший резерв економії зосереджений у системі електропостачання та силових електроприводах. Першочерговими мають бути оптимізація режиму роботи трансформаторної підстанції та вдосконалення електропривода механізму підйому вантажу. Одночасне впровадження організаційних заходів із вирівнювання навантаження та автоматизації допоміжних систем дозволить посилити загальний результат, зменшити пікове навантаження і скоротити непродуктивне споживання електричної енергії.

.

ВИСНОВКИ

Публічне акціонерне товариство «Запорізький металургійний комбінат “Запоріжсталь”» є одним із найбільших підприємств гірничо-металургійного комплексу України. Комбінат здійснює повний технологічний цикл виробництва металопродукції, що охоплює підготовку залізорудної сировини, виплавлення чавуну та сталі, прокатування металу, його термічне й механічне оброблення, а також відвантаження готової продукції споживачам.

До основних виробничих підрозділів підприємства належать агломераційний, доменний, сталеплавильний, обтискний і прокатні цехи, зокрема цех гарячої прокатки тонкого листа та цехи холодної прокатки №1 і №3. Взаємозв’язок між окремими переділами забезпечує послідовне перетворення сировини на готовий листовий прокат із заданими геометричними, механічними та експлуатаційними характеристиками.

Основними видами продукції комбінату є чавун, сталь, гарячекатаний і холоднокатаний листовий прокат, гнуті профілі та інші види металопродукції. Виготовлена продукція використовується у машинобудуванні, будівництві, виробництві металоконструкцій, труб, транспортного обладнання, побутової техніки та інших галузях промисловості.

Одним із ключових виробничих підрозділів комбінату є цех гарячої прокатки тонкого листа. ЦГПТЛ призначений для прокатування листової сталі з вуглецевих, низьколегованих, легованих і нержавіючих марок. Готовою продукцією цеху є гарячекатаний лист і рулонний прокат товщиною переважно від 2 до 7 мм. Проєктна річна виробнича потужність цеху становить близько 3 млн т прокату.

Основним технологічним обладнанням ЦГПТЛ є безперервний тонколистовий стан гарячої прокатки «1680». На ньому здійснюється послідовне обтиснення нагрітих заготовок до отримання металевої смуги необхідної товщини та ширини. Технологічний процес включає подавання

слябів, їх нагрівання, прокатування у чорнових і чистових клітях, охолодження смуги, змотування її в рулони та подальше оброблення.

До допоміжного обладнання цеху належать методичні нагрівальні печі, роликові правильні машини, моталки, обробні й мийні агрегати, травильні установки, гартівні машини, насоси високого тиску, вентилятори, компресори, рольганги та підйомно-транспортні механізми. Функціонування цього обладнання забезпечує безперервність основного технологічного процесу, однак одночасно формує значну частину загального енергоспоживання цеху.

Цех гарячої прокатки тонкого листа належить до найбільш енергоємних виробничих підрозділів комбінату. У процесі виготовлення прокату використовуються природний газ, електрична енергія, пара, стиснене повітря, технічна вода та інші енергетичні ресурси. Особливе значення має електрична енергія, яка використовується для живлення головних приводів прокатного стану, насосів, вентиляторів, моталок, правильних машин, транспортних механізмів, систем вентиляції, кондиціювання та освітлення.

Найбільша частка електроспоживання припадає безпосередньо на прокатний стан і становить близько 36% загального споживання електроенергії цехом. Це пояснюється значною встановленою потужністю головних електроприводів і високими навантаженнями, які виникають під час деформування металу. Системи вентиляції та кондиціювання формують приблизно 6,6% електроспоживання, а зовнішнє та внутрішнє освітлення — близько 3%. Інша частина електроенергії використовується моталками, насосними установками, правильними машинами, травильними й обробними агрегатами та іншими допоміжними механізмами.

Проведений енергетичний аналіз показав, що частина електрообладнання працює з недостатнім завантаженням, у нераціональному режимі або залишається ввімкненою під час технологічних пауз. Це призводить до непродуктивних витрат електроенергії, додаткових втрат у трансформаторах і кабельних лініях, підвищеного споживання реактивної потужності та прискореного зношування обладнання.

На підставі результатів енергетичного аудиту та аналізу режимів роботи електроприймачів запропоновано комплекс організаційно-технічних заходів, спрямованих на скорочення споживання електроенергії без зниження продуктивності й надійності виробництва. До основних заходів належать оптимізація роботи трансформаторної підстанції, вирівнювання графіка навантаження дільниці, зміна режиму роботи механізму підйому вантажу та впровадження регламентованих графіків роботи систем освітлення, вентиляції й повітряно-теплових завіс.

1. Оптимізація роботи трансформаторної підстанції

Система електропостачання ЦГПТЛ включає кілька трансформаторних підстанцій, які забезпечують живлення основного й допоміжного обладнання. Аналіз роботи підстанції дільниці попереднього оброблення металу показав, що коефіцієнт завантаження встановлених трансформаторів становить приблизно 0,45.

Такий режим є недостатньо економічним, оскільки кожен трансформатор, який перебуває під напругою, має постійні втрати холостого ходу незалежно від величини підключеного навантаження. За одночасної роботи кількох малозавантажених агрегатів сумарні втрати можуть бути значними.

Для підвищення ефективності запропоновано вивести один із трансформаторів в оперативний резерв, а навантаження перерозподілити між агрегатами, що залишаються в роботі. Це дозволить підвищити їх коефіцієнт завантаження, зменшити сумарні втрати холостого ходу та покращити використання встановленої потужності підстанції.

Виведення трансформатора в резерв повинно здійснюватися після перевірки максимального навантаження, допустимого нагрівання обладнання, пропускної спроможності кабельних ліній і можливості автоматичного введення резерву. Запропонована схема не повинна знижувати надійність електропостачання відповідальних споживачів.

2. Вирівнювання графіка електричного навантаження дільниці

Добовий графік навантаження дільниці формується внаслідок одночасної роботи технологічного й допоміжного обладнання. Під час збігу запусків насосів високого тиску, вентиляторів обдування, транспортних механізмів та інших потужних електроприймачів виникають короткочасні максимуми активної потужності.

Нерівномірний розподіл споживачів між кабельними лініями та секціями шин може призводити до перевантаження окремих елементів системи електропостачання, збільшення падіння напруги й додаткових втрат електроенергії. Тому запропоновано частково перерозподілити насоси, вентилятори та інші споживачі між наявними кабельними лініями.

Одночасно необхідно рознести в часі запуск потужних агрегатів і узгодити їх роботу з фактичним технологічним навантаженням. Це дозволить вирівняти добовий графік споживання, зменшити пікову потужність, покращити режим роботи трансформаторів і знизити втрати в мережах низької напруги.

Перевагою заходу є можливість його реалізації переважно організаційними методами без масштабної реконструкції обладнання. Для контролю результату доцільно використовувати автоматизовану систему обліку електроенергії та постійно аналізувати погодинні графіки навантаження.

3. Зміна режиму роботи механізму підйому вантажу

Один із кранових підйомних механізмів цеху формально перебуває у тривалому режимі роботи, хоча фактична потреба в його використанні не перевищує приблизно чотирьох годин на добу. В інший час механізм може залишатися підключеним до мережі або перебувати в режимі очікування, що призводить до непродуктивного споживання електроенергії допоміжними системами та втрат у приводі.

Для усунення цих витрат запропоновано перевести механізм у повторно-короткочасний режим роботи. Підключення електропривода до мережі здійснюватиметься лише на період виконання підйомно-транспортних

операцій, після чого обладнання відключатиметься або переводитиметься в енергоощадний режим.

Додатково доцільно застосувати автоматичний контроль тривалості простою, плавний пуск і регулювання швидкості. Це дозволить зменшити пускові струми, механічні удари та зношування канатів, редуктора, гальмівної системи й металоконструкцій крана.

Зміна режиму роботи не повинна впливати на готовність механізму до виконання виробничих завдань. Перед упровадженням необхідно визначити фактичну кількість робочих циклів, тривалість операцій, масу вантажів і допустиму кількість увімкнень електродвигуна за годину.

4. Упровадження графіків роботи освітлення, вентиляції та теплових завіс

Системи освітлення, вентиляції та повітряно-теплових завіс часто працюють незалежно від фактичної присутності працівників, інтенсивності технологічного процесу та температури зовнішнього повітря. У результаті частина обладнання залишається ввімкненою під час перерв, ремонтних простоїв або в незадіяних виробничих зонах.

Для скорочення непродуктивного енергоспоживання запропоновано розробити добові, тижневі та сезонні графіки вмикання й вимикання відповідних систем. Освітлення доцільно організувати за зональним принципом, забезпечивши незалежне керування окремими виробничими, складськими й допоміжними приміщеннями.

Режим роботи вентиляції необхідно узгодити з фактичним технологічним навантаженням. Під час інтенсивної роботи виробничого обладнання вентиляційні системи мають функціонувати з необхідною продуктивністю, а під час пауз — переходити на знижений режим. Повністю відключати вентиляцію дозволяється лише за умови дотримання вимог охорони праці, пожежної безпеки та нормативної якості повітря.

Повітряно-теплові завіси доцільно блокувати з положенням виробничих воріт. Вони повинні автоматично вмикатися під час відкривання воріт і вимикатися після їх закриття із заданою затримкою. У теплий період року

нагрівальні елементи завіс можуть бути відключені, якщо це не суперечить технологічним вимогам.

Для автоматизації графіків можуть використовуватися програмовані реле, таймери, датчики присутності, освітленості, температури та положення воріт. Це зменшить залежність результату від людського фактора та забезпечить стабільне виконання встановлених режимів.

Загальна оцінка запропонованих заходів

Запропонований комплекс заходів спрямований переважно на усунення непродуктивного споживання електроенергії та оптимізацію режимів роботи наявного обладнання. Їх реалізація не потребує повної реконструкції цеху або зупинення основного технологічного процесу.

Найбільша частка загального економічного ефекту очікується від оптимізації роботи трансформаторної підстанції — близько 46%. Зміна режиму роботи механізму підйому вантажу формує приблизно 28% загального ефекту. На вирівнювання графіка навантаження припадає близько 14%, а на впровадження графіків роботи освітлення, вентиляції й теплових завіс — приблизно 12%.

Сукупний очікуваний економічний ефект від реалізації запропонованих організаційно-технічних рішень становить близько 2,7 млн грн на рік. Економія забезпечується скороченням втрат холостого ходу трансформаторів, зменшенням пікової потужності, усуненням простоїв ввімкненого обладнання та регламентуванням роботи допоміжних систем.

Крім безпосереднього зниження витрат на електроенергію, упровадження заходів дозволить розвантажити трансформатори й кабельні лінії, підвищити коефіцієнт використання встановленої потужності, скоротити нагрівання електрообладнання та зменшити інтенсивність його зношування. Це позитивно впливатиме на надійність електропостачання, тривалість міжремонтних періодів і загальну ефективність роботи ЦГПТЛ.

Отже, проведений аналіз підтверджує технічну й економічну доцільність запропонованих заходів. Найбільш раціональним є їх комплексне та поетапне

впровадження з подальшим контролем фактичного споживання електроенергії, максимального навантаження та питомих витрат на одну тонну готового прокату.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Tsekeris, T. Transformations in the European Gas Supply Network Due to the Russia–Ukraine Conflict. *Energies* 2025, *18*, 1709. https://doi.org/10.3390/en18071709

2. Zatonatska, T.; Soboliev, O.; Artyukhov, A.; Zatonatskiy, D.; Balan, V.; Wołowiec, T.; Woźniak, D. Sustainable Energy Investments: ESG-Centric Evaluation and Planning of Energy Projects. *Energies* 2025, *18*, 1942. https://doi.org/10.3390/en18081942

3. Trypolska, G.; Kubatko, O.; Prokopenko, O. Establishing Solar Energy Cooperatives in Ukraine: Regional Considerations and a Practical Guide. *Energies* 2025, *18*, 3623. https://doi.org/10.3390/en18143623

4. Török, L. The European Union's Energy Security Challenges: Import Dependency, Volatility, and Differences Across Member States. *Energies* 2026, *19*, 1362. https://doi.org/10.3390/en19051362

5. Pavlov, K.; Pavlova, O.; Holovchak, M.; Rutkowski, M.; Karkovska, V.; Kornatka, A.; Dziurakh, Y. Assessment of the Effectiveness of Managing Ukraine's Energy Transition: An Indicator Analysis and Comparison with Selected European Union Countries. *Energies* 2026, *19*, 150. https://doi.org/10.3390/en19010150

6. Al Sharari, F.; Yemelyanov, O.; Dziurakh, Y.; Sokil, O.; Danylovych, O. The energy-saving projects' impact on the level of an enterprise's financial stability. Econ. Ann. XXI 2022, 195, 36–49.

7. Fedoreiko, V.; Kravchenko, O.; Sala, D.; Zahorodnii, R.; Pyzalski, M.; Dychkovskyi, R. Management and Optimization of Bio-Resource Decentralized Energy Generation Under Political Instability. *Energies* 2026, *19*, 737. https://doi.org/10.3390/en19030737

8. Trypolska, G.; Kubatko, O.; Prokopenko, O. Establishing Solar Energy Cooperatives in Ukraine: Regional Considerations and a Practical Guide. *Energies* 2025, *18*, 3623. https://doi.org/10.3390/en18143623

9. Prokopenko, O.; Trypolska, G.; Bashynska, I.; Telizhenko, O.; Strelcow, W.; Kovalenko, Y.; Lytvynenko, S.; Woźna, A. Financial Mechanisms and Risk-Based Modeling of Energy Efficiency and Renewable Energy Adoption in Households. *Energies* 2025, *18*, 5799. https://doi.org/10.3390/en18215799

10.https://metinvestholding.com/Content/Entities/Report/32/en/Metinvest_AR 2021.pdf

11.https://www1.eere.energy.gov/manufacturing/tech_assistance/pdfs/steel_cs_ northstar.pdf

12. https://systemax.ua/ua/elektrodvigateli/trehfaznye-obshepromyshlennye-elektrodvigateli/air/air355ma6--160-kvt-1000-ob-min-.html

13. Li P., Fang L., Ji P., Li S., Li W. Motor Soft-Start Technology: Intelligent Control, Wide Bandwidth Applications, and Energy Efficiency Optimization. Energies. 2026. Vol. 19, No. 3. Article 603. DOI: 10.3390/en19030603.

14. Yun J.-W., Choi S.-W., Lee E.-B. Study on Energy Efficiency and Maintenance Optimization of Run-Out Table in Hot Rolling Mills Using Long Short-Term Memory-Autoencoders. Energies. 2025. Vol. 18, No. 9. Article 2295. DOI: 10.3390/en18092295.

15. Maklakov A.S., Jing T., Nikolaev A.A., Gasiyarov V.R. Grid Connection Circuits for Powerful Regenerative Electric Drives of Rolling Mills: Review. Energies. 2022. Vol. 15, No. 22. Article 8608. DOI: 10.3390/en15228608.

16. Beck A., Unterluggauer J., Helminger F., Solís-Gallego I. Decarbonisation Pathways for the Finishing Line in a Steel Plant and Their Implications for Heat Recovery Measures. Energies. 2023. Vol. 16, No. 2. Article 852. DOI: 10.3390/en16020852.

17. Cui J., Meng G., Zhang K., Zuo Z., Song X., Zhao Y., Luo S. Research Progress on Energy-Saving Technologies and Methods for Steel Metallurgy Process Systems—A Review. Energies. 2025. Vol. 18, No. 10. Article 2473. DOI: 10.3390/en18102473.

18. Niekurzak M., Mikulik J. Modeling of Energy Consumption and Reduction of Pollutant Emissions in a Walking Beam Furnace Using the Expert Method—Case Study. Energies. 2021. Vol. 14, No. 23. Article 8099. DOI: 10.3390/en14238099.

19. Mirzaei S., Bohlooli Arkhazloo N., Bazdidi-Tehrani F., Morin J.-B., Loucif A., Jahazi M. Influence of Spacers and Skid Sizes on Heat Treatment of Large Forgings within an Industrial Electric Furnace. Energies. 2023. Vol. 16, No. 7. Article 2936. DOI: 10.3390/en16072936.

20. Voronin S.S. et al. Improving Efficiency of Rolling Mill Stand Electric Drives Through Load Alignment. Energies. 2025. Vol. 18, No. 12. Article 3175. DOI: 10.3390/en18123175.