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 Підвищення енергоефективності роботи мартенівського цеху

Виконав: студент 4 курсу
спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(код і назва спеціальності)
спеціалізації _____
(код і назва спеціалізації)
освітньої програми Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(назва освітньої програми)
_____ Дєєв Р.Ю.
(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
Завідувач кафедри
к.т.н., доц._____Д.М. Морозов
«_____»_____2026__року

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

_____Дєєву Роману Юрійовичу_____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1 Тема роботи Підвищення енергоефективності роботи мартенівського цеху
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.
Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1) Аналіз перспектив підвищення енергетичної ефективності мартенівського цеху ПАТ «Запоріжсталь» 2) Оптимізація енергоспоживання мартенівського цеху ПАТ «Запоріжсталь» шляхом впровадження енергоефективних заходів 3) Техніко-економічне обґрунтування впровадження енергозберігаючих заходів.
4 Перелік графічного матеріалу _1) Аналіз електроспоживання цеху 2) Схема однолінійна 3) План розміщення обладнання цеху 4) Техніко-економічні показники підвищення ефективності електроспоживання цеху.

5 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		

6 Дата видачі завдання 01.02.2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз перспектив підвищення енергетичної ефективності мартенівського цеху ПАТ «Запоріжсталь»	01.03.2026	
2	Оптимізація енергоспоживання мартенівського цеху ПАТ «Запоріжсталь» шляхом впровадження енергоефективних заходів	01.04.2026	
3	Техніко-економічне обгрунтування впровадження енергозберігаючих заходів.	10.05.2026	

Студент _____ Р. Ю. Дєєв
(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 містить 96 сторінок, 41 таблиця, 11 джерел.

У роботі досліджено комплекс технічних та організаційних заходів, спрямованих на підвищення ефективності електроспоживання мартенівського цеху ВАТ «Запоріжсталь».

В основній частині виконано аналіз структури енергоспоживання цеху та визначено обладнання, на яке припадає найбільша частка витрат енергетичних ресурсів. Розглянуто перспективні напрями підвищення енергоефективності виробництва, обґрунтовано доцільність упровадження енергозберігаючих заходів і розраховано очікуваний обсяг економії енергоресурсів унаслідок їх реалізації.

В економічній частині роботи проведено оцінювання ефективності запропонованих рішень. Економічну доцільність проєкту визначено на основі розрахунку строку окупності капітальних вкладень, чистої теперішньої вартості (NPV), внутрішньої норми рентабельності (IRR) та індексу прибутковості (PI). Отримані результати дають змогу оцінити інвестиційну привабливість запропонованих заходів і можливість їх практичного впровадження в умовах мартенівського цеху.

ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ, ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ПРОЦЕС, ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ, МОДЕРНІЗАЦІЯ, ЕНЕРГОАУДИТ, МАРТЕНІВСЬКЕ ВИРОБНИЦТВО

ЗМІСТ

Вступ..... 7

1 Аналіз перспектив підвищення енергетичної ефективності мартенівського цеху ПАТ «Запоріжсталь..... 11

1.1 Опис об’єкта дослідження 11

1.2 Технологія виробництва цеху..... 8

1.3 Аналіз енергоспоживання мартенівського цеху..... 24

1.4 Можливі заходи підвищення ефективності електроспоживання цеху 7

1.5 Обґрунтування доцільності застосування компенсації реактивної потужності..... 45

1.6 Заміна двигунів димососів мартенівських печей на енергоефективні..... 52

1.7 Заплановані заходи з підвищення ефективності електроспоживання ……56

2 Оптимізація енергоспоживання мартенівського цеху ПАТ «Запоріжсталь» шляхом впровадження енергоефективних заходів 60

2.1Розрахунки заходів щодо зниження витрати електричної енергії..... 60

2.1.1 Розрахунок зниження витрати електричної енергії за рахунок модернізації насосної станції..... 60

2.1.2 Розрахунок зниження витрати електричної енергії за рахунок застосування частотних перетворювачів кранових механізмів з пристроями рекуперації..... 64

2.1.3 Розрахунок зниження витрати електричної енергії за рахунок заміни електродвигуна димососу 69

3 РОЗРАХУНОК ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАХОДІВ З ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ МАРТЕНІВСЬКОГО ЦЕХУ 74

3.1 Модернізації насосної станції 79
3.2 Заміна димососів мартенівських печей 85
Висновки 91
Перелік посилань 75

ВСТУП

Однією з ключових передумов зниження виробничих витрат, підвищення конкурентоспроможності продукції та покращення загальної економічної ефективності промислових підприємств є раціональне використання паливно-енергетичних ресурсів. За умов постійного зростання вартості електричної енергії, природного газу та інших енергоносіїв питання енергозбереження набуває особливої актуальності. Витрати на енергоресурси формують значну частку собівартості промислової продукції, тому навіть відносно незначне скорочення питомого енергоспоживання може забезпечити суттєвий економічний ефект.

Перехід вітчизняної промисловості до енергоефективної моделі розвитку можливий лише за умови розроблення та послідовної реалізації комплексних програм енергозбереження безпосередньо на рівні окремих підприємств. Такі програми повинні передбачати систематичне обстеження енергетичного господарства, визначення найбільш енергоємних технологічних процесів, оцінювання наявного потенціалу економії ресурсів, формування переліку організаційних і технічних заходів, а також контроль результативності їх впровадження. Для виконання цих завдань необхідним є створення сучасної методологічної, інформаційної та нормативної бази, яка дозволить обґрунтовано приймати управлінські рішення у сфері енергоменеджменту.

Несвоєчасне впровадження енергозберігаючих заходів призводить до значних економічних втрат. Підприємства змушені нести додаткові витрати, пов’язані з нераціональним використанням палива, електроенергії, теплової енергії, води та стисненого повітря. Крім безпосереднього збільшення собівартості продукції, надмірне споживання енергоресурсів прискорює зношування обладнання, підвищує аварійність, погіршує надійність систем енергопостачання та збільшує обсяги шкідливих викидів у навколишнє середовище. Отже, відкладання модернізації виробництва негативно впливає не

лише на фінансовий стан підприємства, а й на загальну екологічну та соціально-економічну ситуацію в регіоні.

Показники ефективності використання енергоресурсів є важливими характеристиками результативності функціонування будь-якого промислового підприємства. Особливого значення вони набувають у металургійному виробництві, яке традиційно характеризується високою матеріало- та енергоємністю. Для металургійних підприємств скорочення питомих витрат палива й електроенергії є не лише засобом підвищення прибутковості, а й необхідною умовою збереження конкурентних позицій, стабільної роботи та подальшого розвитку в умовах нестабільного енергетичного ринку.

Значна частина енергетичних ресурсів на металургійних підприємствах споживається прокатним виробництвом. У прокатних цехах підприємств повного металургійного циклу частка первинних енергоресурсів може досягати приблизно 20 % від їх загального споживання на комбінаті. Частка електричної енергії зазвичай є дещо меншою, однак також залишається суттєвою. Наприклад, для металургійного підприємства повного циклу сортового напряму розподіл електроспоживання між основними виробництвами може мати такий вигляд: доменне виробництво — близько 4 %, коксохімічне — 9 %, сталеплавильне — 5 %, прокатне — 16 %, енергетичне господарство — 47 %, механічні та інші допоміжні підрозділи — приблизно 6 %. Наведена структура свідчить про значний потенціал підвищення енергоефективності як основного технологічного обладнання, так і допоміжних систем.

У прокатному виробництві значні обсяги електроенергії споживають головні та допоміжні електроприводи прокатних станів, підйомно-транспортні механізми, рольганги, ножиці, насоси, вентилятори, компресорні установки, системи вентиляції, освітлення та водопостачання. Додаткові втрати виникають через роботу електродвигунів із низьким завантаженням, нераціональне регулювання продуктивності насосів і вентиляторів, підвищене споживання реактивної потужності, незадовільну якість електроенергії, простої обладнання під напругою та відсутність автоматизованого контролю енергоспоживання.

Кінцевим результатом діяльності підприємства у сфері енергозбереження має бути зниження абсолютних і питомих енерговитрат. У разі стабільного обсягу виробництва ефективність заходів визначається скороченням витрат на придбання енергоресурсів. За умов зміни виробничої програми доцільно оцінювати зменшення питомого споживання енергії на одиницю продукції та частки енергетичних витрат у загальній собівартості. Такий підхід дозволяє об’єктивніше оцінити результати впроваджених заходів і відокремити фактичний ефект енергозбереження від впливу коливань обсягів виробництва.

Зниження енергоспоживання може бути забезпечене різними групами заходів. До організаційних заходів належать оптимізація режимів роботи обладнання, скорочення непродуктивних простоїв, удосконалення системи обліку та контролю, призначення відповідальних осіб за енергоспоживання і впровадження системи енергетичного менеджменту. Технічні заходи передбачають модернізацію електроприводів, застосування частотних перетворювачів, компенсацію реактивної потужності, заміну застарілого обладнання, підвищення ефективності систем освітлення, вентиляції, водопостачання та теплопостачання. До більш складних і капіталомістких рішень належать реконструкція технологічних агрегатів, утилізація вторинних енергоресурсів, впровадження автоматизованих систем управління та створення комплексних систем енергетичного моніторингу.

Методи енергозбереження можуть класифікуватися за обсягом необхідних капітальних вкладень, складністю технічної реалізації, рівнем наукоємності, тривалістю впровадження та строком окупності. Першочергове значення зазвичай мають маловитратні організаційні заходи, які можуть забезпечити швидкий економічний ефект. Водночас найбільший довгостроковий результат досягається завдяки комплексній модернізації технологічного та енергетичного обладнання.

ПАТ «Запоріжсталь» належить до найбільших металургійних підприємств України та займає важливе місце у промисловому комплексі країни. Комбінат спеціалізується на виробництві чавуну, сталі, гарячекатаного та

холоднокатаного листового прокату, продукції з вуглецевих, низьколегованих, легованих і нержавіючих марок сталі, гнутих профілів, жерсті, будівельних матеріалів і товарів широкого споживання. Продукція підприємства широко використовується в машинобудуванні, будівництві, транспортній галузі, харчовій промисловості та інших секторах економіки.

Комбінат є одним із провідних постачальників листового прокату та гнутих профілів для українських машинобудівних підприємств, а також жерсті, яка застосовується у виробництві металевої тари для харчової промисловості. Масштабність виробництва, складність технологічних процесів і значна кількість енергоємного обладнання обумовлюють високий рівень споживання електричної енергії, природного газу, теплової енергії, води та інших ресурсів. Саме тому реалізація енергозберігаючих заходів на підприємстві має не лише економічне, а й стратегічне значення.

ПАТ «Запоріжсталь» послідовно реалізує заходи, спрямовані на скорочення споживання природного газу та покупних енергоресурсів. Відповідно до технологічної стратегії групи «Метінвест» на підприємстві здійснюється модернізація основного й допоміжного обладнання, удосконалюються режими роботи технологічних агрегатів, впроваджуються сучасні системи автоматизації та обліку енергоресурсів. Особлива увага приділяється використанню вторинних енергетичних ресурсів, зниженню теплових втрат, підвищенню ефективності електроприводів та оптимізації роботи систем вентиляції, водопостачання і стисненого повітря.

Системна реалізація таких заходів дозволяє зменшувати енергетичну складову собівартості металопродукції, підвищувати продуктивність обладнання, скорочувати обсяги викидів забруднювальних речовин і покращувати екологічні показники виробництва. Подальше підвищення енергоефективності прокатних цехів ПАТ «Запоріжсталь» доцільно здійснювати на основі комплексного енергетичного обстеження, аналізу фактичних режимів роботи обладнання та техніко-економічного оцінювання запропонованих енергозберігаючих рішень.

1 Аналіз перспектив підвищення енергетичної ефективності мартенівського цеху ПАТ «Запоріжсталь»

1.1 Опис об’єкта дослідження

Публічне акціонерне товариство «Запорізький металургійний комбінат «Запоріжсталь» є одним із найбільших підприємств гірничо-металургійного комплексу України. Завдяки значним виробничим потужностям, широкому асортименту продукції та важливому внеску в розвиток вітчизняної чорної металургії комбінат традиційно вважають одним із провідних металургійних підприємств країни.

МК «Запоріжсталь» є підприємством із повним металургійним циклом, який охоплює підготовку залізорудної сировини, виробництво агломерату, виплавку чавуну і сталі, а також виготовлення гарячекатаного та холоднокатаного листового прокату. Розміщення комбінату в Запоріжжі було зумовлене близькістю до енергетичних ресурсів Дніпровської гідроелектростанції, донецького вугілля та залізної руди Криворізького басейну.

Рішення про спорудження в Запоріжжі великого комплексу підприємств чорної та кольорової металургії було прийнято у травні 1929 року. Одним із головних об’єктів майбутнього Дніпровського промислового комплексу став завод листових сталей, на базі якого надалі було сформовано металургійний комбінат «Запоріжсталь».

Будівництво підприємства розпочалося на початку 1930-х років. Проєктування основних виробничих об’єктів здійснював Всесоюзний інститут «Гіпромез». У жовтні 1932 року промисловий майданчик майбутнього комбінату почав отримувати електроенергію від щойно введеної в експлуатацію Дніпровської гідроелектростанції, яка на той час була найбільшою гідроелектростанцією країни.

Днем заснування комбінату вважається 16 листопада 1933 року, коли на підприємстві було отримано перший чавун. Перша доменна піч мала корисний об’єм 960 м³ і на момент введення в експлуатацію була однією з найпотужніших в Україні. У 1934 році розпочала роботу доменна піч № 2, а у 1938 році — доменна піч № 3, об’єм якої становив близько 1300 м³.

У 1935 році на комбінаті було введено в експлуатацію першу мартенівську піч, після чого почали працювати ще два сталеплавильні агрегати. У 1937 році запрацював перший вітчизняний обтискний стан «Слябінг», який став першим подібним агрегатом у країні, одним із перших у Європі та третім у світі.

У 1938 році на підприємстві було введено в експлуатацію перший у Європі безперервний стан гарячої прокатки тонколистової сталі. За своєю потужністю та пропускною спроможністю новий прокатний комплекс на той час не мав аналогів у європейській металургії. У 1939 році розпочав роботу цех холодної прокатки № 1.

До 1940 року комбінат забезпечував значну частину виробництва сталевого листа в країні. Завдяки розвитку «Запоріжсталі» підприємства автомобільного, сільськогосподарського та інших галузей машинобудування отримали можливість використовувати тонколистовий прокат вітчизняного виробництва.

Виробнича структура комбінату

До складу основного виробництва МК «Запоріжсталь» входять:

агломераційний цех;

доменний цех;

мартенівський цех;

ливарний цех;

обтискний цех;

цех гарячої прокатки тонкого листа;

цех холодної прокатки № 1;

цех холодної прокатки № 3;

цех підготовки виробництва та складів.

У різні періоди експлуатації кількість металургійних агрегатів і виробнича потужність окремих цехів змінювалися внаслідок реконструкції, модернізації, виведення застарілого обладнання та впровадження нових технологічних рішень.

Крім основних виробничих підрозділів, на підприємстві функціонує розвинена допоміжна інфраструктура. До неї належать ремонтні цехи, підпорядковані службі головного механіка, енергетичні підрозділи під керівництвом головного енергетика, центральна заводська лабораторія, інженерний корпус, управління капітального будівництва, цех металоконструкцій, а також підрозділи автомобільного та залізничного транспорту.

Допоміжні служби забезпечують технічне обслуговування і ремонт обладнання, постачання енергетичних ресурсів, лабораторний контроль якості сировини та готової продукції, підготовку виробництва, транспортування вантажів і виконання будівельно-монтажних робіт.

Агломераційне виробництво

Агломераційний цех є початковою ланкою металургійного виробничого циклу комбінату. У ньому виготовляється офлюсований залізорудний агломерат, який використовується як основна складова шихти доменних печей.

Виробничий комплекс агломераційного цеху охоплює обладнання для приймання, підготовки, дозування та змішування компонентів шихти, її спікання, охолодження, дроблення, сортування й транспортування готового агломерату до доменного цеху.

У складі цеху експлуатуються шість агломераційних машин із площею спікання 62,5 м² кожна. Проєктна виробнича потужність цеху становить приблизно 4,2 млн тонн агломерату на рік. Значна частина технологічних операцій із підготовки та спікання агломераційної шихти автоматизована, що сприяє стабілізації якості продукції та зменшенню витрат енергетичних ресурсів.

Доменне виробництво

Основною продукцією доменного цеху є переробний і ливарний чавун. Переробний чавун використовується переважно як сировина для виплавки сталі в мартенівському цеху, тоді як ливарний чавун спрямовується до ливарного виробництва або реалізується стороннім споживачам.

У різні періоди у складі доменного цеху експлуатувалися чотири або п’ять доменних печей. Корисний об’єм основних агрегатів становив приблизно 1513–1525 м³, а першої доменної печі — 960 м³. Залежно від складу обладнання та режимів його роботи річна виробнича потужність доменного виробництва оцінювалася в межах 2,3–3,5 млн тонн чавуну.

На доменних печах виплавляється переробний чавун марок П1 і П2, ливарний чавун марок Л1–Л5, а також чавун, рафінований магнієм. Частина переробного чавуну розливається на спеціальних розливних машинах у чушки різної маси та відвантажується споживачам.

Ливарний чавун використовується для виготовлення виливниць, піддонів, деталей металургійного обладнання та інших литих виробів. Характерною особливістю чавуну виробництва МК «Запоріжсталь» є порівняно низький вміст сірки й фосфору, що позитивно впливає на його технологічні властивості та конкурентоспроможність.

Мартенівське виробництво

Мартенівський цех є однією з основних ланок повного металургійного циклу комбінату. У різні роки до його складу входили від семи до дев’яти мартенівських печей, а також двованний сталеплавильний агрегат. Місткість окремих печей становила приблизно 280–500 тонн.

Залежно від кількості діючих агрегатів і технологічних режимів річна виробнича потужність мартенівського цеху оцінювалася в межах 3,3–4,0 млн тонн сталі.

Виплавка сталі здійснюється скрап-рудним способом із використанням рідкого чавуну, сталевого брухту, залізної руди, флюсів та інших матеріалів. Основним паливом мартенівських печей є природний газ. Для інтенсифікації процесу плавлення та скорочення тривалості плавки застосовується кисень.

Для поліпшення якості металу та вирівнювання його хімічного складу сталь продувається аргоном. У мартенівському цеху виплавляються маловуглецеві, конструкційні та леговані марки сталі. Готовий метал розливається у злитки масою до 18,6–20 тонн, які надалі використовуються для виробництва листового прокату.

Значне споживання природного газу, кисню, електричної енергії, води та інших ресурсів визначає мартенівський цех як один із найбільш енергоємних підрозділів комбінату. Саме тому підвищення ефективності використання палива, утилізація теплоти відхідних газів, удосконалення режимів горіння та модернізація допоміжного обладнання мають важливе значення для зниження собівартості сталі.

Ливарне виробництво

Ливарний цех є базовим підрозділом для виготовлення литих деталей, запасних частин і змінного металургійного обладнання, необхідного для роботи основних і допоміжних цехів комбінату. Частина продукції також може постачатися стороннім споживачам.

До складу ливарного виробництва входить спеціалізоване відділення з виготовлення виливниць. Його проєктна потужність становить приблизно 360 тис. тонн продукції на рік. Крім виливниць, у цеху виготовляються піддони, деталі механічного обладнання та інші металеві вироби.

Прокатне виробництво

Прокатне виробництво комбінату представлене обтискним цехом, цехом гарячої прокатки тонкого листа, а також цехами холодної прокатки № 1 і № 3.

У складі прокатного комплексу експлуатуються прокатні стани, агрегати поздовжнього та поперечного різання металу, обладнання для дресирування, травлення, нанесення покриттів, змотування рулонів і виробництва холодногнутих профілів.

Загальна виробнича потужність прокатного виробництва становить близько 3 млн тонн листового прокату на рік. Потужність виробництва холодногнутих профілів перевищує 500–600 тис. тонн на рік.

Обтискний цех

Основним агрегатом обтискного цеху є стан «Слябінг-1150». На ньому здійснюється прокатування сталевих злитків масою до 20 тонн у сляби, призначені для подальшого виробництва листового прокату.

Для прокатування використовуються злитки з вуглецевих, легованих і нержавіючих марок сталі. Товщина отриманих слябів становить приблизно 100–200 мм, ширина — 1000–1500 мм, а довжина — 1800–4700 мм.

Характерною особливістю технологічної схеми обтискного цеху є передавання більшої частини гарячих слябів безпосередньо до цеху гарячої прокатки тонкого листа. Після прокатування злитків сляби розрізаються на мірні довжини та в гарячому стані направляються на наступну технологічну операцію.

За транзитною схемою може перероблятися близько 80 % загального обсягу продукції обтискного стану. Решта слябів надходить на склад, додаткову обробку або підігрів. Сляби з температурою, нижчою за допустиму для прокатування, направляються до методичних печей цеху гарячої прокатки тонкого листа.

Цех гарячої прокатки тонкого листа

Цех гарячої прокатки тонкого листа оснащений безперервним тонколистовим станом «1680» і комплексом технологічно пов’язаних машин та агрегатів.

Максимальна виробнича потужність стану становить приблизно 3,7 млн тонн прокату на рік. На ньому виготовляються гарячекатані смуги товщиною 2,0–8,0 мм і шириною 860–1500 мм. Маса готового рулону може досягати 16 тонн.

Готовою продукцією цеху є гарячекатаний прокат у листах і рулонах. Довжина окремих листів може становити до 5850 мм. Цех обладнаний агрегатами для поперечного та поздовжнього різання, змотування смуг у рулони, оброблення крайок та підготовки продукції до відвантаження.

На трьох профілезгинальних агрегатах виготовляється понад 500 типорозмірів холодногнутих профілів із вуглецевих і низьколегованих сталей.

Товщина металу, що переробляється, становить приблизно 1,0–8,0 мм, а ширина розгортки профілю може досягати 1440 мм.

Цех холодної прокатки № 1

Цех холодної прокатки № 1 спеціалізується на виготовленні холоднокатаного плоского прокату та сталевої стрічки. Основну продукцію становлять листи й рулони з вуглецевих і низьколегованих марок сталі.

У цеху експлуатуються безперервний стан «1680», реверсивні стани «1680» і «1200», стан «1700», а також вузькосмугові стани «450» і «650». Технологічне обладнання забезпечує холодне прокатування, дресирування, поперечне різання та поздовжній розпуск металевої смуги.

Товщина готового холоднокатаного прокату становить від 0,2 до 2,0 мм, а його ширина — від 10 до 1500 мм. Довжина листів може досягати 3950–4000 мм, а маса рулонів — 15–16 тонн.

Холоднокатаний прокат характеризується високою точністю геометричних розмірів, покращеною якістю поверхні та необхідними механічними властивостями. Така продукція широко використовується в автомобілебудуванні, машинобудуванні, будівництві, виробництві побутової техніки та інших галузях промисловості.

Таким чином, МК «Запоріжсталь» являє собою складний багатофункціональний промисловий комплекс із повним металургійним циклом. Взаємозв’язок агломераційного, доменного, сталеплавильного та прокатного виробництв дає змогу здійснювати послідовне перетворення залізорудної сировини на готовий листовий прокат.

Водночас значні масштаби виробництва та використання енергоємного обладнання зумовлюють високі витрати палива, електричної і теплової енергії. У зв’язку з цим важливими напрямами розвитку комбінату є модернізація технологічних агрегатів, удосконалення систем енергопостачання, утилізація вторинних енергетичних ресурсів, автоматизація виробничих процесів і впровадження комплексних заходів з енергозбереження.

1.2 Технологія виробництва цеху

Технологічний процес являє собою сукупність взаємопов’язаних дій працівників і засобів праці, у результаті яких відбувається цілеспрямована зміна форми, фізичних і хімічних властивостей або стану предмета праці. У металургійному виробництві технологічний процес охоплює підготовку сировини, завантаження шихтових матеріалів, їх нагрівання і плавлення, видалення небажаних домішок, доведення металу до заданого хімічного складу та випуск готової сталі.

Мартенівський спосіб виробництва сталі виник у зв’язку з необхідністю перероблення значних обсягів металобрухту. Використання великої кількості твердої металевої шихти в конвертерах було обмежене недостатньою кількістю тепла, що виділялося під час технологічного процесу. Розв’язанням цієї проблеми стало створення полуменевої регенеративної печі, яка згодом отримала назву мартенівської.

У першій половині ХХ століття мартенівське виробництво було одним з основних способів виплавляння сталі. У певний період його частка перевищувала 80 % загального світового виробництва сталі. Проте подальший розвиток киснево-конвертерної та електросталеплавильної технологій поступово призвів до скорочення використання мартенівських печей.

Широке поширення мартенівського способу пояснювалося насамперед його універсальністю. Плавлення можна було здійснювати з використанням як твердої, так і рідкої шихти, змінюючи співвідношення металобрухту та рідкого чавуну в широких межах. Технологія не висувала надто високих вимог до якості вихідної сировини, дозволяла достатньо точно контролювати перебіг плавлення та забезпечувала високий вихід придатного металу. У мартенівських печах можна було виплавляти широкий асортимент вуглецевих, низьколегованих та інструментальних сталей.

Мартенівська піч є складною теплотехнічною спорудою, основні елементи якої виконуються з вогнетривких матеріалів. Для забезпечення механічної міцності піч обладнується зовнішнім металевим каркасом, утвореним системою балок і стяжок.

Робочий простір печі обмежується зверху склепінням, знизу — подом, спереду і ззаду — вогнетривкими стінками, а з боків — головками. Через головки до робочого простору подаються паливо та повітря, необхідне для горіння, а також відводяться продукти згоряння. Подина печі має форму витягнутої овальної чаші, у якій розміщується металева ванна та безпосередньо здійснюються процеси нагрівання, плавлення й очищення металу.

У передній стінці печі розташовуються завантажувальні вікна, через які подають тверді шихтові матеріали, флюси та інші добавки. У задній частині передбачається випускний отвір, через який після завершення плавлення готову сталь випускають у сталерозливний ківш.

До основних складових мартенівської шихти належать рідкий або твердий чавун, сталевий скрап, металобрухт, відходи металургійного виробництва, залізна руда, вапняк, вапно, розкиснювачі та легуючі добавки. Співвідношення окремих компонентів визначається технологічним варіантом плавлення, необхідною маркою сталі та характеристиками наявної сировини.

Підготовка шихти передбачає виконання комплексу операцій, спрямованих на забезпечення її відповідності технологічним вимогам. Негабаритний металобрухт піддають різанню або дробленню, а дрібні металеві відходи пресують у пакети. Вапняк дроблять до необхідного розміру, а чушковий чавун сортують за марками, класами та категоріями. Крім чавуну і металобрухту, до складу шихти можуть входити обрізки прокату, браковані виливки та інші металеві відходи.

Підготовлені шихтові матеріали разом із флюсами завантажують у робочий простір печі. Після попереднього прогрівання твердої частини шихти до печі подають рідкий чавун. Від цього моменту починається основний період плавлення. Однією з головних характеристик мартенівської печі є її садка, тобто

загальна маса металевої частини шихти, яку можна завантажити протягом однієї плавки.

Основу мартенівського процесу становлять окиснювальні реакції, під час яких із металевої шихти отримують рідку сталь заданого хімічного складу. На відміну від конвертерного процесу, необхідна для плавлення теплова енергія надходить переважно від полум’я, яке утворюється внаслідок спалювання газоподібного або іншого виду палива в робочому просторі печі.

Для забезпечення температури, достатньої для плавлення металу, паливо і повітря перед надходженням до печі попередньо нагріваються в регенераторах. Нагрівання здійснюється за рахунок теплоти продуктів згоряння, що залишають робочий простір. Такий принцип регенерації дозволяє частково повертати теплоту відхідних газів у технологічний процес, підвищувати температуру горіння та зменшувати витрати палива.

Після надходження до робочого простору паливо змішується з підігрітим повітрям і згоряє. Теплота полум’я передається шихтовим матеріалам переважно випромінюванням і конвекцією. Під її дією тверді компоненти нагріваються, розм’якшуються та поступово переходять у рідкий стан.

Одночасно з плавленням відбувається окиснення компонентів металевої шихти. Залізо частково переходить в оксидну форму, а кремній, марганець, вуглець та інші домішки утворюють відповідні продукти окиснення. Газоподібні продукти видаляються разом із димовими газами, а тверді й рідкі оксиди переходять до складу шлаку, який накопичується на поверхні металевої ванни.

Важливу роль у процесі відіграє виділення бульбашок оксиду вуглецю. Піднімаючись крізь рідкий метал, вони сприяють перемішуванню ванни, вирівнюванню її температури та хімічного складу, а також інтенсифікують видалення небажаних домішок. Цей етап отримав назву кипіння металевої ванни.

Після утворення суцільного шару шлаку безпосередній контакт металу з киснем полум’я та повітря суттєво обмежується. Подальше окиснення домішок відбувається переважно завдяки оксидам заліза, які містяться у шлаку та частково розчиняються в металі. Хоча надлишок оксидів заліза в готовій сталі є

небажаним, під час плавлення вони виконують важливу технологічну функцію, забезпечуючи киснем процеси окиснення кремнію, марганцю та вуглецю.

Для видалення сірки та фосфору до шихти вводять флюси, переважно вапняк або вапно. Вони забезпечують формування основного шлаку, здатного зв’язувати шкідливі домішки та переводити їх із металу в шлакову фазу. Для покращення рухливості й зниження в’язкості шлаку в окремих випадках застосовують боксити або плавиковий шпат.

Під час нагрівання вапняк розкладається з утворенням вапна та вуглекислого газу. Отримане вапно входить до складу шлаку, взаємодіє зі сполуками фосфору і сприяє їх видаленню з металевої ванни. За відповідних температурних і хімічних умов основний шлак також забезпечує часткове видалення сірки.

Для прискорення процесу плавлення та зменшення витрат палива до робочого простору може подаватися технічний кисень. Його використання підвищує інтенсивність горіння палива та прискорює окиснення домішок. Унаслідок цього скорочується тривалість плавки, збільшується продуктивність печі та зменшується питома витрата палива.

Інтенсивність окиснювальних процесів також можна підвищити введенням залізної руди. Кисень, що міститься в оксидах руди, бере участь в окисненні домішок, тоді як відновлене залізо переходить до металевої ванни. Це дозволяє не лише очищувати метал, а й певною мірою підвищувати вихід готової сталі.

Водночас до якості залізної руди висуваються підвищені вимоги. Наявність у ній значної кількості сірки та фосфору є небажаною, оскільки ці домішки можуть переходити до металу. Для їх видалення необхідно сформувати шлак відповідного складу, основності та температури.

У процесі плавлення шлак періодично видаляють або оновлюють залежно від технологічного режиму. Одночасно відбирають проби металу та шлаку для визначення їх хімічного складу. Результати аналізів використовують для коригування складу ванни, введення додаткових флюсів, окиснювачів, розкиснювачів або легуючих матеріалів.

Після досягнення необхідного вмісту вуглецю та інших елементів здійснюється завершальне доведення металу. Оскільки після окиснювального періоду в рідкій сталі залишається певна кількість розчиненого кисню, перед випуском проводиться розкиснення. Для цього до металу вводять феросплави та інші матеріали, компоненти яких мають високу спорідненість до кисню. Утворені продукти розкиснення переходять у шлак або видаляються з металу у вигляді неметалевих включень.

За потреби одночасно з розкисненням здійснюється легування сталі. До металевої ванни або сталерозливного ковша вводять феросплави та чисті легуючі елементи, які забезпечують отримання необхідних механічних, фізичних і технологічних властивостей продукції. Після завершення доведення готову сталь випускають із печі.

У мартенівських печах переважно виплавляли вуглецеві конструкційні сталі звичайної та підвищеної якості. Технологія також дозволяла виробляти окремі марки інструментальних і низьколегованих сталей. Однак значна тривалість плавки, висока витрата палива та складність забезпечення сучасних екологічних вимог суттєво обмежили подальше використання цього способу.

У міру розвитку киснево-конвертерних процесів та електродугової плавки мартенівське виробництво почало втрачати економічну доцільність. Нові технології забезпечували значно вищу продуктивність, кращі умови автоматизації, нижчі питомі витрати енергії та ширші можливості контролю якості металу. У більшості промислово розвинених країн мартенівські печі були поступово виведені з експлуатації.

Основним недоліком мартенівського процесу є його низька енергетична ефективність. Значна частина теплоти втрачається з відхідними газами, через футерування, завантажувальні вікна та інші конструктивні елементи печі. Попри використання регенераторів, витрата палива залишається високою, а тривалість однієї плавки значно перевищує тривалість киснево-конвертерного або електросталеплавильного процесу.

Тривалий технологічний цикл знижує продуктивність обладнання, збільшує витрати на обслуговування та ремонт, прискорює зношування вогнетривкої кладки. Крім того, мартенівські печі потребують значних виробничих площ, розвиненої системи газопостачання, складного димового господарства та постійного контролю стану регенераторів.

Мартенівський спосіб також характеризується значним негативним впливом на навколишнє середовище. Під час спалювання великих обсягів палива утворюються викиди пилу, оксидів азоту, оксидів сірки, оксиду та діоксиду вуглецю. Додатковими джерелами забруднення є операції завантаження шихти, зливання шлаку та випуску металу.

Порівняно з киснево-конвертерним та електросталеплавильним виробництвом мартенівська технологія характеризується вищою собівартістю продукції, більшою питомою витратою палива та значнішими викидами забруднювальних і парникових газів. За наявними оцінками, собівартість мартенівської сталі могла приблизно на 15 % перевищувати собівартість сталі, отриманої сучаснішими способами. Викиди шкідливих речовин також могли бути приблизно на 40 % вищими, а обсяги парникових газів — у кілька разів більшими залежно від складу палива, стану обладнання та прийнятої технології.

Таким чином, мартенівський спосіб відіграв важливу історичну роль у розвитку світової металургії та забезпечив можливість масового використання металобрухту у виробництві сталі. Водночас за сучасних умов він не відповідає вимогам щодо продуктивності, енергетичної ефективності, економічності та екологічної безпеки. Тому заміна мартенівських печей киснево-конвертерними й електросталеплавильними агрегатами є закономірним напрямом технічного переоснащення металургійних підприємств.

1.3 Аналіз енергоспоживання мартенівського цеху

Енергоефективність як фактор виживання металургійного виробництва

Ефективне використання енергоресурсів є одним із ключових індикаторів успішності сучасного промислового підприємства. Для металургійної галузі, яка традиційно є однією з найбільш енергомістких, мінімізація енерговитрат — це базовий критерій збереження конкурентоспроможності на ринку.

У прокатних цехах металургійних підприємств повного циклу споживання первинних енергоресурсів може становити до 20% від загальнозаводського обсягу. Частка електроенергії в цих процесах є дещо меншою.

Базовий розподіл електроенергії за видами виробництва (для підприємства повного циклу сортового напрямку): * Енергетичне господарство — 47% * Прокатне виробництво — 16% * Коксохімічне виробництво — 9% * Сталеплавильне виробництво — 5% * Доменне виробництво — 4% * Механічні та допоміжні служби — 6%

Головною метою енергозбереження є зниження прямих фінансових витрат на купівлю паливно-енергетичних ресурсів. За умов коливання обсягів виробництва ключовим показником стає зменшення питомої ваги енергоскладової у собівартості готової продукції. Цього результату досягають через впровадження класифікованих комплексів заходів, які різняться за рівнями капіталомісткості, окупності та наукомісткості.

Стратегія енергоефективності ПАТ “Запоріжсталь”

ПАТ “Запоріжсталь” стабільно входить до четвірки найбільших промислових підприємств України, забезпечуючи внутрішній та зовнішній ринки високоякісним чавуном, сталлю, листовим прокатом (із вуглецевих, низьколегованих та нержавіючих сталей), гнутим профілем та жерстю. Підприємство є стратегічним постачальником для українського машинобудування та харчової промисловості.

Дотримуючись глобальної технологічної стратегії групи “Метінвест”, комбінат системно реалізує програми модернізації. Завдяки цьому у 2025 році забезпечено стійку динаміку зниження споживання природного газу та покупних енергоресурсів.

Основними компонентами енергобалансу сталеплавильного (мартенівського) цеху є:

Першочергові ресурси: природний газ, електрична енергія, пара, стиснуте повітря, аргон.

Допоміжні ресурси: технічна та питна вода, кисень, азот, водень.

Аналіз енергоспоживання цеху за даними 2025 року

Нижче наведено фактичні показники споживання електричної енергії та інших матеріально-енергетичних ресурсів цеху за підсумками 2025 року, що враховують оптимізацію роботи обладнання та оновлення систем освітлення.

Таблиця 1.1 – Споживання електричної енергії основним обладнанням цеху (2025 рік)

№	Електрообладнання	Потужність *P*, кВт	Час роботи за рік, год	Споживання електроенергії, кВт·год	Питома витрата, кВт·год/т
1	Крани металургійні	10 360,9	716,19	828 851	2,62
2	Насосна станція води високого тиску	544,04	720,00	291 600	0,91
3	Система освітлення (модернізована)	310,50	600,00	172 650	0,44
4	Електрообладнання мартенівських печей	2 837,3	519,65	177 390	0,40

Таблиця 1.2 – Загальне споживання ключових енергоресурсів цехом (2025 рік)

Вид енергоресурсу	Одиниця виміру	Річний обсяг споживання	Питома витрата на 1 тонну сталі
Електрична енергія	тис. кВт·год	1 470,49	4,37
Природний газ	тис. м³	12 450,00	37,20
Кисень технологічний	тис. м³	8 120,00	24,10
Стиснуте повітря	м³	1 680 000	5,02
Технічна вода	м³	415 000	1,24

Характеристика схеми та надійності електропостачання

Основна маса споживачів електричної енергії в цеху — це машини та агрегати, які отримують живлення від низьковольтних мереж напругою 0,4 кВ. До цієї групи належать:

Електродвигуни вентиляційних систем та насосних агрегатів;

Підйомно-транспортні механізми (кранове господарство);

Системи внутрішнього, зовнішнього й аварійного освітлення;

Кліматичне обладнання та кондиціонери.

Живлення споживачів 0,4 кВ здійснюється від понижувальних розподільних підстанцій (РП) 6 / 0,4 кВ. Окремою групою виділено високовольтні споживачі напругою 6 кВ, до яких належать потужні двигуни спеціалізованих установок (зокрема, земснарядів).

Електроприймачі цеху мають спокійний графік навантаження. Підключення виконується до трифазної мережі 6 кВ та 380/220 В із частотою 50 Гц. Для запобігання перекосу фаз однофазні навантаження розподілені рівномірно. Режим роботи обладнання не спричиняє деградації параметрів живильної мережі та повністю відповідає вимогам діючих стандартів щодо якості електричної енергії в системах загального призначення.

За ступенем надійності електропостачання об’єкти цеху відносяться до III-ї категорії згідно з ПУЕ. Відповідно до чинних нормативних інструкцій Мінпаливенерго України щодо визначення технологічної та аварійної броні, проведений у 2025 році технічний аудит підтвердив відсутність у складі цеху споживачів, які потребують окремого внесення до актів екологічної або аварійної броні електропостачання.

1.4 Перспективні заходи з підвищення ефективності використання електроенергії в цеху

Підвищення ефективності використання електричної енергії в цеху має здійснюватися на основі комплексної модернізації основного та допоміжного електротехнічного обладнання. Основними завданнями такої модернізації є скорочення непродуктивних витрат електроенергії, зменшення максимального навантаження на систему електропостачання, підвищення надійності електроприводів, покращення умов експлуатації обладнання та зниження витрат на його технічне обслуговування.

Значну частину електроспоживання цеху формують електроприводи насосів високого тиску, підйомно-транспортні механізми, вентиляційні установки, допоміжні агрегати та системи освітлення. Ефективність роботи цих споживачів залежить не тільки від технічних характеристик встановленого обладнання, а й від режимів його експлуатації, рівня завантаження, способів регулювання продуктивності та якості організації енергетичного обліку.

До найбільш перспективних заходів підвищення ефективності електроспоживання цеху належать:

- модернізація електроприводів насосів високого тиску;
- застосування частотно-регульованого електропривода;
- автоматизація керування насосними агрегатами;
- оптимізація каскадної роботи насосів;
- впровадження засобів захисту від аварійних режимів;
- модернізація електроприводів вантажопідйомних кранів;
- використання систем рекуперації електричної енергії;
- встановлення фільтрів вищих гармонік;
- упровадження багатотарифного обліку електроенергії;
- створення автоматизованої системи контролю та обліку електроенергії.

Загальну характеристику запропонованих заходів наведено в таблиці 1.3.

Таблиця 1.3 – Основні напрями підвищення ефективності електроспоживання цеху

Напрям модернізації	Зміст заходу	Очікуваний результат
Насосне обладнання	Заміна морально та фізично застарілих насосів і двигунів	Зменшення питомого споживання електроенергії, підвищення ККД
Частотне регулювання	Регулювання швидкості електродвигунів відповідно до фактичного навантаження	Скорочення непродуктивного споживання електроенергії
Автоматизація	Застосування контролерів, датчиків тиску, витрати та рівня	Підтримання заданих технологічних параметрів
Каскадне керування насосами	Поетапне вмикання агрегатів залежно від споживання води	Оптимальне завантаження насосного обладнання
Рекуперація енергії	Повернення енергії гальмування електроприводів у мережу	Зменшення втрат у гальмівних резисторах
Покращення якості електроенергії	Встановлення дроселів і фільтрів гармонік	Зниження спотворення струму та додаткових втрат
Автоматизований облік	Упровадження АСКОЕ та багатотарифних лічильників	Підвищення точності обліку й оперативності контролю
Організаційні заходи	Оптимізація графіків роботи та контроль холостого ходу	Зменшення пікових навантажень і витрат електроенергії

Модернізація насосів високого тиску

Безперебійне водопостачання є необхідною умовою стабільної роботи технологічного обладнання металургійного цеху. Вода застосовується для охолодження металу, валків, підшипникових вузлів, елементів печей, газоочисного обладнання та інших технологічних установок. Порушення роботи насосної системи може спричинити зниження продуктивності, аварійне зупинення обладнання та погіршення якості продукції.

На насосних станціях, які тривалий час перебувають в експлуатації, часто використовуються морально та фізично застарілі насосні агрегати. Таке

обладнання характеризується зниженим коефіцієнтом корисної дії, підвищеним рівнем електроспоживання, частими відмовами та значними витратами на ремонт.

Нерідко встановлена потужність електродвигуна перевищує фактичну потребу насосного агрегату. Це пояснюється вибором двигуна із запасом, зміною параметрів гідравлічної мережі, зношуванням насоса або зменшенням технологічного навантаження. Робота недовантаженого двигуна супроводжується зниженням його ККД і коефіцієнта потужності.

Під час модернізації доцільно здійснювати спільний вибір насоса та електродвигуна. Їх характеристики мають відповідати фактичним параметрам витрати води, напору, тривалості роботи та змінності виробництва. Просте встановлення двигуна меншої потужності без аналізу гідравлічних характеристик системи може спричинити його перевантаження та зниження продуктивності насоса.

Основні недоліки наявного насосного обладнання та способи їх усунення представлені в таблиці 1.4.

Таблиця 1.4 – Недоліки насосного обладнання та заходи щодо їх усунення

Виявлений недолік	Наслідок для роботи системи	Рекомендований захід
Завищена потужність двигуна	Робота з низьким завантаженням і зниженим ККД	Уточнення навантаження та вибір двигуна оптимальної потужності
Зношення робочого колеса насоса	Зниження подачі й напору, збільшення електроспоживання	Ремонт або заміна насоса
Дросельне регулювання засувкою	Втрати енергії на подолання додаткового опору	Встановлення перетворювача частоти
Часті прямі пуски	Підвищені пускові струми та механічні удари	Застосування плавного пуску або частотного перетворювача
Робота без води	Перегрівання та аварійне пошкодження насоса	Встановлення захисту від сухого ходу

Нерівномірне завантаження насосів	Неоднаковий знос агрегатів	Автоматичне чергування насосів
Відсутність контролю параметрів	Несвоєчасне виявлення відхилень	Установлення датчиків тиску, витрати та температури
Значні втрати в трубопроводах	Підвищена необхідна потужність насоса	Очищення, ремонт або заміна ділянок трубопроводу

Заміна насосних агрегатів має супроводжуватися діагностуванням трубопровідної мережі. Значні гідравлічні втрати можуть виникати через відкладення на внутрішніх поверхнях труб, зменшення їх прохідного перерізу, несправність арматури, надмірну кількість місцевих опорів та витоки води. За таких умов навіть сучасний насос не забезпечить максимального енергозберігаючого ефекту.

Автоматизація насосної станції

Автоматизація насосної станції дозволяє узгодити продуктивність агрегатів із поточними потребами технологічного процесу. Система автоматичного керування отримує інформацію від датчиків, порівнює фактичні значення параметрів із заданими та формує керувальні сигнали для насосів і перетворювачів частоти.

Автоматизована система повинна забезпечувати підтримання необхідного тиску, витрати або рівня води. У разі зміни технологічного навантаження продуктивність насосів автоматично збільшується або зменшується. Це виключає тривалу роботу обладнання з надлишковою подачею та дозволяє скоротити споживання електроенергії.

Основні функції автоматизованого керування насосною станцією наведено в таблиці 1.5.

Таблиця 1.5 – Функції автоматизованої насосної станції

Функція	Призначення
Підтримання тиску	Забезпечення стабільного тиску в технологічній мережі
Регулювання витрати	Узгодження подачі води з фактичним споживанням

Контроль рівня	Запобігання переповненню або спорожненню резервуарів
Автоматичне введення резерву	Вмикання резервного агрегату у разі відмови робочого
Чергування насосів	Забезпечення приблизно однакового напрацювання обладнання
Захист від сухого ходу	Відключення насоса за відсутності води на вході
Захист від перевантаження	Запобігання перегріванню та пошкодженню двигуна
Контроль напруги	Відключення або блокування роботи за небезпечних відхилень
Дистанційне керування	Контроль роботи станції з диспетчерського пункту
Діагностування	Виявлення несправностей і формування аварійних повідомлень
Архівування параметрів	Збереження даних для подальшого аналізу
Автоматичне відновлення	Поновлення роботи після короткочасного порушення живлення

Автоматизація дозволяє зменшити вплив людського чинника, підвищити оперативність керування та скоротити кількість помилок персоналу. Дистанційний контроль особливо важливий для насосних станцій, розташованих на значній відстані від основних виробничих дільниць.

Застосування частотно-регульованого електропривода

Одним із найбільш ефективних способів зменшення електроспоживання насосного обладнання є застосування перетворювачів частоти. Частотний перетворювач регулює швидкість обертання електродвигуна відповідно до поточної потреби у воді. За зменшення технологічного навантаження швидкість насоса знижується, унаслідок чого скорочується споживана потужність.

На відміну від дросельного способу, за якого насос працює з постійною швидкістю, а витрата обмежується засувкою, частотне регулювання не створює штучного гідравлічного опору. Електроенергія витрачається безпосередньо на забезпечення необхідної подачі та напору.

Ефективність застосування частотного перетворювача залежить від характеру навантаження. Найбільший ефект досягається на установках зі

змінною витратою, які значну частину часу працюють із продуктивністю, нижчою за номінальну. Якщо насос постійно працює з максимальною продуктивністю, можливості економії за рахунок регулювання швидкості є обмеженими.

Порівняння основних способів регулювання продуктивності насосів наведено в таблиці 1.6.

Таблиця 1.6 – Порівняння способів регулювання продуктивності насосів

Критерій	Дросельне регулювання	Каскадне регулювання	Частотне регулювання
Спосіб зміни подачі	Зміна положення засувки	Вмикання або вимикання насосів	Зміна швидкості двигуна
Енергетична ефективність	Низька	Середня	Висока
Плавність регулювання	Обмежена	Ступінчаста	Плавна
Пускові струми	Високі	Високі без пристроїв плавного пуску	Обмежені
Гідравлічні удари	Можливі	Можливі під час перемикання	Практично усуваються
Точність підтримання тиску	Невисока	Середня	Висока
Зношування обладнання	Підвищене	Залежить від частоти перемикань	Знижене
Складність автоматизації	Невисока	Середня	Вища
Початкові витрати	Низькі	Середні	Підвищені
Експлуатаційні витрати	Високі	Середні	Нижчі

Застосування частотного регулювання забезпечує не лише економію електроенергії, а й покращує умови роботи механічного обладнання. Плавний розгін двигуна знижує пускові струми, усуває різкі механічні навантаження на вал, муфти, підшипники та кріплення. Плавне зниження швидкості під час зупинення насоса зменшує ймовірність виникнення гідравлічних ударів.

Основні результати впровадження частотно-регульованого електропривода узагальнено в таблиці 1.7.

Таблиця 1.7 – Очікувані результати частотного регулювання насосів

Результат	Характеристика ефекту
Зменшення електроспоживання	Потужність двигуна узгоджується з фактичною потребою технологічного процесу
Зниження пускових струмів	Зменшується навантаження на кабелі, апаратуру та трансформатори
Усунення гідравлічних ударів	Підвищується надійність трубопроводів і запірної арматури
Стабілізація тиску	Підтримується заданий технологічний режим
Зменшення витоків	Знижується надлишковий тиск у трубопроводах
Збільшення ресурсу насоса	Скорочується механічне та гідравлічне навантаження
Зменшення витрат на ремонт	Знижується частота аварійних відмов
Підвищення рівня автоматизації	Забезпечується дистанційне та програмне керування
Зниження шуму	Насос тривалий час працює зі зменшеною швидкістю
Підвищення технологічної гнучкості	Параметри роботи швидко адаптуються до виробничих потреб

За даними експлуатації насосних установок, реальна економія електроенергії від упровадження частотного регулювання зазвичай залежить від графіка навантаження, технічного стану насоса та гідравлічної мережі. Найбільший результат можна отримати за комплексної модернізації, яка передбачає одночасну заміну застарілого насоса, встановлення енергоефективного двигуна, частотного перетворювача та засобів автоматичного керування.

Для кожного насосного агрегату необхідно експериментально визначати робочий діапазон швидкості, за якого питомі витрати електроенергії є найменшими. Надмірне зниження швидкості може спричинити падіння ККД насоса, недостатній напір і погіршення охолодження електродвигуна.

Оптимізація каскадної роботи насосів

За значних коливань витрати води доцільно використовувати каскадне керування групою насосів. У такій системі один насос може працювати з

регульованою швидкістю, а додаткові агрегати вмикаються лише за збільшення споживання.

Каскадна система забезпечує поетапну зміну загальної продуктивності насосної станції. Автоматичний контролер аналізує тиск або витрату та визначає необхідну кількість працюючих агрегатів. За зменшення навантаження зайві насоси відключаються.

Можливі варіанти організації каскадної роботи наведено в таблиці 1.8.

Таблиця 1.8 – Варіанти керування групою насосів

Варіант	Принцип роботи	Переваги	Недоліки
Усі насоси без регулювання	Агрегати вмикаються ступінчасто	Простота системи	Значні коливання тиску та високі пускові струми
Один регульований насос	Один насос працює від перетворювача, інші — безпосередньо від мережі	Помірна вартість, плавне регулювання в межах одного агрегату	Обмежена точність за широкого діапазону навантажень
Один перетворювач із перемиканням	Перетворювач почергово підключається до різних насосів	Зменшення кількості перетворювачів	Ускладнення комутаційної схеми
Окремий перетворювач для кожного насоса	Швидкість усіх агрегатів регулюється незалежно	Максимальна енергоефективність і гнучкість	Найбільші початкові витрати
Комбінована система	Поєднання регульованих і нерегульованих насосів	Баланс вартості та ефективності	Необхідність ретельного налаштування

Для рівномірного використання ресурсу обладнання система повинна автоматично змінювати черговість вмикання насосів. Основним насосом періодично призначається агрегат із найменшим напрацюванням. Це дозволяє уникнути ситуації, коли один насос постійно працює, а інші тривалий час залишаються в резерві.

Захист і діагностування насосних агрегатів

Енергетична ефективність обладнання безпосередньо пов’язана з його технічним станом. Пошкоджені підшипники, порушення центрування валів, кавітація, забруднення робочого колеса та підвищене тертя призводять до зростання електроспоживання.

Автоматизована система повинна забезпечувати контроль струму, напруги, температури двигуна, тиску, витрати, вібрації та стану підшипникових вузлів. Відхилення цих параметрів від установлених меж може свідчити про розвиток несправності.

Таблиця 1.9 – Основні види захисту насосного обладнання

Вид захисту	Контрольований параметр	Результат спрацювання
Від перевантаження	Струм двигуна	Зниження навантаження або відключення
Від короткого замикання	Струм і стан мережі	Швидке аварійне відключення
Від перегрівання	Температура обмоток і підшипників	Попередження або зупинення агрегату
Від сухого ходу	Тиск або наявність води на вході	Відключення насоса
Від кавітації	Тиск, вібрація та шум	Сигналізація та коригування режиму
Від зниження напруги	Напруга живлення	Блокування роботи або відключення
Від обриву фази	Симетрія фазних струмів	Відключення двигуна
Від перевищення тиску	Тиск у напірному трубопроводі	Зниження швидкості або зупинення
Вібраційний захист	Рівень вібрації	Сигналізація несправності
Контроль витоків	Витрата й баланс води	Виявлення пошкодженої ділянки

Покращення якості електроенергії під час застосування частотних перетворювачів

Застосування частотних перетворювачів може супроводжуватися появою в мережі вищих гармонічних складових струму. Несинусоїдальний струм створює додаткові втрати в трансформаторах, кабельних лініях та електродвигунах, а також може впливати на роботу конденсаторних установок, засобів автоматики та електронних лічильників.

Рівень спотворень залежить від потужності перетворювачів, їх схемного виконання, параметрів трансформатора та співвідношення потужності нелінійного навантаження із загальною потужністю системи електропостачання.

Для зменшення негативного впливу перетворювальної техніки можуть використовуватися мережеві дроселі, дроселі в колі постійного струму, пасивні фільтри та активні фільтрокомпенсувальні пристрої.

Таблиця 1.10 – Засоби зниження вищих гармонік

Засіб	Місце встановлення	Основна функція	Доцільність застосування
Мережевий дросель	На вході перетворювача	Обмеження імпульсного струму та зменшення гармонік	Для окремих приводів невеликої та середньої потужності
Дросель постійного струму	У проміжному колі перетворювача	Згладжування струму	За наявності відповідної конструкції перетворювача
Пасивний фільтр	Між мережею та перетворювачем	Зменшення визначених гармонічних складових	За стабільного складу навантаження
Активний фільтр	На шинах розподільного пристрою	Динамічна компенсація гармонік	За значної кількості нелінійних навантажень
Багатопульсна схема	У складі перетворювальної установки	Зменшення гармонік вхідного струму	Для приводів великої потужності
Перетворювач з активним випрямлячем	У складі регульованого привода	Формування струму, близького до синусоїдального	Для відповідальних і потужних механізмів

Вибір засобів фільтрації має здійснюватися за результатами вимірювання показників якості електроенергії. Необґрунтоване встановлення фільтрів може не забезпечити необхідного результату або створити резонансні явища в мережі.

Модернізація електроприводів вантажопідйомних кранів

У металургійних цехах широко застосовуються мостові, козлові та спеціальні технологічні крани. Значна частина такого обладнання оснащена релейно-контакторними системами керування та асинхронними двигунами з фазним ротором.

Регулювання швидкості в традиційних кранових електроприводах здійснюється шляхом введення додаткових резисторів у коло ротора. Електрична енергія при цьому перетворюється на теплоту, що знижує загальну ефективність привода. Крім того, ступінчаста зміна швидкості створює механічні удари, підвищує зношування редукторів, муфт, канатів і гальмівних пристроїв.

Модернізація кранових механізмів передбачає заміну релейно-контакторної системи на частотно-регульований електропривод. Перетворювач частоти забезпечує плавний розгін, гальмування, регулювання швидкості та обмеження пускового моменту.

Таблиця 1.11 – Порівняння традиційного та частотно-регульованого кранового привода

Показник	Релейно-контакторний привод	Частотно-регульований привод
Регулювання швидкості	Ступінчасте	Плавне
Пуск двигуна	З підвищеними струмами	Контрольований
Механічні навантаження	Значні	Знижені
Втрати в резисторах	Високі	Відсутні або мінімальні
Точність позиціонування	Невисока	Висока
Залежність швидкості від вантажу	Значна	Незначна
Технічне обслуговування	Часте обслуговування контакторів і резисторів	Переважно діагностування електронної системи
Можливість рекуперації	Відсутня	Може бути реалізована
Рівень автоматизації	Обмежений	Високий
Енергетична ефективність	Низька	Підвищена

Під час реконструкції кранового обладнання доцільно замінювати електродвигуни з фазним ротором на двигуни з короткозамкненим ротором, релейно-контакторні панелі — на комплектні частотні електроприводи, а командоапарати — на сучасні пульти керування.

Рекуперація електричної енергії

Під час опускання вантажу або гальмування механізму електродвигун може переходити в генераторний режим. У традиційних частотних електроприводах утворена електрична енергія спрямовується до гальмівного резистора та перетворюється на теплоту.

Для механізмів із частими гальмуваннями або тривалою роботою в генераторному режимі доцільно застосовувати рекуперативні модулі. Вони повертають енергію гальмування до внутрішньоцехової мережі, де вона може бути використана іншими споживачами.

Таблиця 1.12 – Порівняння способів використання енергії гальмування

Показник	Гальмівний резистор	Рекуперативний модуль
Використання енергії	Перетворення на теплоту	Повернення до мережі
Нагрівання приміщення	Значне	Мінімальне
Необхідність охолодження	Може бути потрібне	Менша
Початкова вартість	Нижча	Вища
Експлуатаційні витрати	Вищі через втрати енергії	Нижчі
Доцільність	Рідкі та короткочасні гальмування	Часті гальмування та опускання вантажів
Енергозберігаючий ефект	Відсутній	Залежить від режиму роботи
Можливість спільної роботи приводів	Обмежена	Можливе об’єднання кіл постійного струму
Вплив на мікроклімат	Підвищення тепловиділень	Зменшення тепловиділень

Найбільший ефект рекуперація забезпечує для потужних механізмів із великим числом циклів за зміну, значною масою вантажу та тривалим опусканням. Перед упровадженням необхідно проаналізувати графік роботи крана, тривалість генераторних режимів і можливість приймання енергії цеховою мережею.

Упровадження багатотарифного обліку електроенергії

Багатотарифний облік передбачає диференціацію вартості електроенергії залежно від періоду доби. Для підприємства це створює можливість перенесення

частини енергоємних операцій із періодів максимального навантаження енергосистеми на години з нижчою вартістю електроенергії.

Ефективність багатотарифного обліку залежить від гнучкості технологічного процесу. Не всі операції можуть бути перенесені в часі, однак заряджання акумуляторів, робота частини насосів, підготовчі операції, нагрівання допоміжних матеріалів або виконання ремонтних робіт можуть плануватися з урахуванням тарифних зон.

Таблиця 1.13 – Заходи з оптимізації добового графіка навантаження

Захід	Механізм реалізації	Очікуваний результат
Перенесення допоміжних операцій	Виконання робіт поза піковими годинами	Зменшення витрат на електроенергію
Обмеження одночасного пуску двигунів	Формування послідовності вмикання	Зниження максимальної потужності
Використання резервуарів води	Накопичення води за низького тарифу	Зменшення роботи насосів у пікові години
Автоматичне керування навантаженням	Програмне відключення другорядних споживачів	Запобігання перевищенню договірної потужності
Планування ремонтів	Зупинення обладнання в періоди високого тарифу	Зниження оплати за електроенергію
Вирівнювання змінного навантаження	Узгодження роботи технологічних агрегатів	Зменшення піків і провалів графіка

Створення автоматизованої системи контролю та обліку електроенергії

Результативне управління електроспоживанням неможливе без достовірної та оперативної інформації. З цією метою доцільно впровадити автоматизовану систему контролю та обліку електроенергії.

АСКОЕ забезпечує автоматичне вимірювання, збирання, передавання, оброблення, зберігання та відображення інформації про споживання активної й реактивної електроенергії. Система дозволяє контролювати навантаження окремих дільниць, агрегатів, трансформаторів і фідерів.

У межах підприємства можуть функціонувати комерційний і технічний рівні обліку. Комерційний облік використовується для розрахунків із

постачальником електроенергії, а технічний — для внутрішнього аналізу споживання окремими підрозділами.

Таблиця 1.14 – Порівняння комерційного і технічного обліку

Критерій	Комерційний облік	Технічний облік
Основне призначення	Розрахунки за електроенергію	Внутрішній контроль і аналіз
Об’єкти контролю	Межі балансової належності	Цехи, дільниці, агрегати
Вимоги до точності	Підвищені	Визначаються завданнями підприємства
Кількість точок	Відносно невелика	Може бути значною
Можливість зміни структури	Обмежена	Висока
Використання інформації	Фінансові розрахунки	Енергоменеджмент і нормування
Періодичність аналізу	За розрахунковими періодами	У реальному часі або за короткими інтервалами
Доступ персоналу	Регламентований	Визначається внутрішніми правами доступу

Основні завдання АСКОЕ цеху полягають у підвищенні точності обліку, визначенні балансу електроенергії, контролі максимального навантаження, виявленні непродуктивних витрат і підготовці інформації для прийняття управлінських рішень.

Таблиця 1.15 – Основні функції АСКОЕ цеху

Функція	Зміст
Вимірювання електроенергії	Облік активної та реактивної енергії
Контроль потужності	Реєстрація поточних і максимальних навантажень
Збирання даних	Автоматичне опитування електронних лічильників
Архівування	Довгострокове зберігання параметрів електроспоживання
Формування балансу	Порівняння надходження та розподілу електроенергії
Виявлення втрат	Визначення небалансів між точками обліку
Тарифний аналіз	Розподіл споживання за тарифними зонами

Формування звітів	Підготовка добових, місячних і річних документів
Контроль зв’язку	Виявлення порушення передавання даних
Діагностування приладів	Контроль працездатності лічильників
Керування доступом	Захист інформації від несанкціонованих змін
Передавання інформації	Обмін даними із суміжними автоматизованими системами

АСКОЕ може мати дворівневу структуру. Нижній рівень складається з електронних лічильників, вимірювальних трансформаторів і пристроїв збирання даних. Верхній рівень містить сервер, базу даних, автоматизовані робочі місця та програмне забезпечення для аналізу.

Таблиця 1.16 – Структура автоматизованої системи обліку

Рівень системи	Основне обладнання	Виконувані функції
Вимірювальний	Лічильники, трансформатори струму і напруги	Безпосереднє вимірювання параметрів
Рівень збирання	Контролери та пристрої передавання даних	Опитування лічильників і первинна обробка
Канали зв’язку	Кабельні, оптичні або бездротові мережі	Передавання інформації
Серверний	Сервер і база даних	Зберігання та систематизація інформації
Аналітичний	Програмне забезпечення	Формування балансів, графіків і звітів
Робочі місця	Комп’ютери енергетичного персоналу	Оперативний контроль і прийняття рішень

Упровадження технічного обліку на рівні окремих агрегатів дозволяє визначити фактичне питоме споживання електроенергії, порівнювати роботу однотипного обладнання та своєчасно виявляти відхилення. Різке збільшення споживання за незмінної продуктивності може свідчити про несправність механізму, погіршення режиму або помилки персоналу.

Організаційні заходи

Поряд із технічним переоснащенням необхідно реалізовувати маловитратні організаційні заходи. Вони не потребують значних капітальних вкладень, але можуть забезпечити помітне зменшення електроспоживання.

До таких заходів належать:

- відключення обладнання під час тривалих простоїв;
- скорочення роботи двигунів у режимі холостого ходу;
- контроль завантаження електродвигунів;
- складання оптимальних графіків роботи обладнання;
- запобігання одночасному пуску потужних споживачів;
- регулярне очищення насосів, вентиляторів і теплообмінників;
- контроль стану підшипників і змащувальних систем;
- усунення витоків води та стисненого повітря;
- технічне навчання персоналу;
- встановлення цільових показників питомого електроспоживання.

Таблиця 1.17 – Організаційні заходи з енергозбереження

Захід	Необхідні витрати	Строк реалізації	Потенційний результат
Усунення холостого ходу	Низькі	Короткий	Скорочення непродуктивного споживання
Контроль графіків навантаження	Низькі	Короткий	Зменшення максимуму потужності
Навчання персоналу	Низькі	Короткий	Покращення експлуатаційної дисципліни
Профілактичне обслуговування	Середні	Постійно	Підтримання високого ККД обладнання
Усунення витоків	Низькі або середні	Короткий	Зменшення навантаження насосів
Нормування електроспоживання	Низькі	Середній	Контроль питомих витрат
Енергетичні обходи	Низькі	Постійно	Оперативне виявлення втрат
Аналіз даних АСКОЕ	Низькі після впровадження системи	Постійно	Прийняття обґрунтованих рішень

Визначення пріоритетності заходів

Вибір заходів повинен здійснюватися за результатами енергетичного обстеження та техніко-економічного аналізу. Насамперед доцільно впроваджувати рішення, які мають невеликий строк окупності, не потребують тривалого зупинення виробництва та забезпечують помітне скорочення електроспоживання.

Попередню пріоритетність заходів наведено в таблиці 1.18.

Таблиця 1.18 – Попередня оцінка пріоритетності енергозберігаючих заходів

Захід	Капіталомісткість	Складність упровадження	Очікуваний ефект	Пріоритет
Усунення холостого ходу	Низька	Низька	Середній	Високий
Оптимізація графіка навантаження	Низька	Низька	Середній	Високий
Установлення технічного обліку	Середня	Середня	Високий	Високий
Частотне регулювання насосів	Середня	Середня	Високий	Високий
Автоматизація насосної станції	Середня	Середня	Високий	Високий
Заміна застарілих насосів	Висока	Середня	Високий	Середній
Модернізація кранових приводів	Висока	Висока	Високий	Середній
Рекуперація енергії	Середня або висока	Висока	Залежить від режиму	Середній
Установлення фільтрів гармонік	Середня	Середня	Залежить від вимірювань	За результатами обстеження
Повномасштабна АСКОЕ	Висока	Висока	Високий довгостроковий	Середній

Отже, підвищення ефективності електроспоживання цеху доцільно здійснювати комплексно. Найбільший практичний інтерес становить модернізація насосних агрегатів із застосуванням частотно-регульованого електропривода, автоматизація каскадної роботи насосів, реконструкція кранових електроприводів і впровадження автоматизованого обліку електроенергії.

Поєднання технічних та організаційних заходів дозволить знизити питоме споживання електроенергії, скоротити максимальне навантаження, підвищити надійність обладнання та зменшити експлуатаційні витрати. Остаточний склад заходів має визначатися після аналізу фактичних графіків навантаження, технічного стану обладнання та розрахунку економічної ефективності кожного запропонованого рішення.

1.5 Обґрунтування доцільності застосування компенсації реактивної потужності

Основну частину електричного навантаження промислових підприємств становлять асинхронні електродвигуни, трансформатори, зварювальні установки, індукційні печі та інші електроприймачі індуктивного характеру. Під час їх роботи з електричної мережі споживається не тільки активна, а й реактивна потужність.

Активна потужність безпосередньо перетворюється на механічну роботу, теплоту, світло або інші корисні види енергії. Реактивна потужність не виконує

корисної роботи, проте необхідна для створення електромагнітних полів у двигунах, трансформаторах та інших електротехнічних пристроях. Її циркуляція між джерелом живлення та електроприймачами збільшує струмове навантаження на елементи системи електропостачання.

Наявність реактивної складової струму спричиняє фазовий зсув між напругою і струмом та зменшення коефіцієнта потужності. За однакової активної потужності зниження коефіцієнта потужності призводить до збільшення повного струму, який проходить через трансформатори, кабельні й повітряні лінії, комутаційні апарати та розподільні пристрої.

Найбільш несприятливі режими виникають під час роботи електродвигунів із малим навантаженням або на холостому ходу. У таких умовах активна складова струму суттєво зменшується, тоді як струм намагнічування залишається майже незмінним. Унаслідок цього коефіцієнт потужності може знижуватися до 0,2–0,4, а частка реактивної потужності у загальному навантаженні мережі істотно зростає.

Основні наслідки низького коефіцієнта потужності наведено в таблиці 1.19.

Таблиця 1.19 – Наслідки передавання реактивної потужності електричною мережею

Наслідок	Характеристика
Збільшення струму	Для передавання однакової активної потужності мережею проходить більший струм
Додаткові втрати електроенергії	Зростають теплові втрати у трансформаторах, кабелях і шинопроводах
Зниження напруги	Збільшуються втрати напруги на ділянках мережі
Перевантаження обладнання	Зменшується резерв пропускної здатності трансформаторів і ліній

Збільшення перерізу провідників	Під час проєктування виникає потреба у застосуванні кабелів більшого перерізу
Додаткові витрати підприємства	Можуть збільшуватися платежі, пов’язані з перетіканням реактивної електроенергії
Погіршення режиму електропостачання	Підвищується ймовірність перевантажень і відхилень напруги
Обмеження підключення нових споживачів	Частина потужності трансформаторів і мереж використовується для передавання реактивної складової

Зменшити передавання реактивної потужності від зовнішнього джерела до електроприймачів можна шляхом її компенсації безпосередньо в електричній мережі підприємства. Компенсувальний пристрій генерує реактивну потужність поблизу місця її споживання, унаслідок чого зменшується реактивна складова струму, що надходить із системи електропостачання.

Основним засобом компенсації реактивної потужності в мережах промислових підприємств є конденсаторні установки. Їх застосування пояснюється простотою конструкції, порівняно невисокою вартістю та можливістю встановлення на різних рівнях системи електропостачання.

Переваги конденсаторних установок порівняно з іншими компенсувальними пристроями наведено в таблиці 1.20.

Таблиця 1.20 – Переваги конденсаторних установок

Перевага	**Практичне значення**
Невеликі втрати активної потужності	Власне споживання конденсаторної установки є незначним
Відсутність рухомих частин	Зменшуються вимоги до технічного обслуговування
Порівняно невисока вартість	Скорочується обсяг початкових капітальних вкладень
Модульність	Необхідну потужність можна сформувати з окремих конденсаторних ступенів
Можливість місцевого встановлення	Компенсація може здійснюватися безпосередньо біля електроприймача
Безшумність роботи	Установки не створюють механічного шуму
Простота монтажу	Обладнання можна встановлювати в наявних електричних мережах

Автоматичне регулювання	Потужність установки може змінюватися залежно від навантаження
Незначні габарити	Для розміщення не потрібні великі виробничі площі
Можливість поетапного розширення	Кількість ступенів можна збільшувати в разі зміни навантаження

Втрати активної потужності в сучасних конденсаторних установках є значно меншими, ніж у синхронних компенсаторах або синхронних двигунах, які працюють у режимі перезбудження. Крім того, конденсаторні установки не потребують складних систем збудження, мають високу експлуатаційну надійність і можуть встановлюватися практично в будь-якій точці мережі.

Залежно від місця встановлення та кількості споживачів, які обслуговуються, розрізняють індивідуальну, групову та централізовану компенсацію реактивної потужності.

Індивідуальна компенсація

За індивідуальної компенсації конденсаторна установка приєднується безпосередньо до окремого електроприймача та вмикається одночасно з ним. Такий спосіб найбільш доцільний для потужних електродвигунів та інших споживачів, які тривалий час працюють із відносно постійним навантаженням.

Основною перевагою індивідуальної компенсації є розвантаження від реактивної потужності практично всіх ділянок мережі — від зовнішнього джерела живлення до електроприймача. Зменшуються струми в цехових розподільних лініях, трансформаторах і мережах вищої напруги.

Недоліком є залежність роботи конденсаторної установки від режиму конкретного електроприймача. Потужність конденсаторів необхідно узгоджувати з фактичним реактивним навантаженням двигуна. Надмірна компенсація може спричинити підвищення напруги та виникнення небажаних резонансних явищ.

Індивідуальна компенсація є малоефективною для двигунів, які працюють короткочасно, часто вмикаються або мають значні коливання навантаження.

Групова компенсація

За групової компенсації одна конденсаторна установка обслуговує декілька електроприймачів, підключених до спільного розподільного пункту або секції шин. Такий спосіб доцільно застосовувати для групи однотипних механізмів, які мають близькі режими роботи.

Конденсаторні установки можуть установлюватися на шинах цехових розподільних пристроїв напругою 0,4 кВ. У цьому випадку від реактивної потужності розвантажуються живильні мережі та трансформатори підстанції.

Водночас ділянки мережі між розподільним пунктом і окремими електроприймачами продовжують передавати реактивну потужність. Тому групова компенсація поступається індивідуальній за рівнем зниження втрат у внутрішньоцехових мережах.

Централізована компенсація

Централізована компенсація застосовується в системах із великою кількістю споживачів та змінним добовим графіком реактивного навантаження. Конденсаторна установка підключається до шин головної знижувальної або цехової трансформаторної підстанції.

Під час установлення батарей конденсаторів на шинах 6–10 кВ від реактивної потужності розвантажуються зовнішні живильні мережі та трансформатори вищих рівнів системи електропостачання. Перевагою такого варіанта є відносно невелика необхідна кількість високовольтних конденсаторів і нижча питома вартість компенсувальної потужності.

Недоліком високовольтної централізованої компенсації є те, що внутрішні мережі підприємства напругою 6–10 та 0,4 кВ продовжують передавати реактивну потужність. Унаслідок цього втрати електроенергії в них не зменшуються повною мірою.

У разі встановлення конденсаторної установки на шинах 0,4 кВ цехової трансформаторної підстанції розвантажуються живильні мережі 6–10 кВ та силові трансформатори. Реактивне навантаження залишається лише в лініях від шин низької напруги до окремих електроприймачів.

Порівняльну характеристику способів компенсації наведено в таблиці 1.21.

Таблиця 1.21 – Порівняння способів компенсації реактивної потужності

Критерій	**Індивідуальна**	**Групова**	**Централізована**
Місце встановлення	Біля окремого електроприймача	На груповому розподільному пункті	На шинах підстанції
Кількість споживачів	Один	Декілька	Значна кількість
Характер навантаження	Переважно постійний	Відносно однорідний	Змінний
Розвантаження внутрішніх мереж	Максимальне	Часткове	Обмежене
Складність керування	Низька	Середня	Підвищена
Необхідність регулювання	Зазвичай відсутня	Може бути потрібна	Переважно необхідна
Капітальні витрати	Високі за великої кількості приймачів	Середні	Відносно невисокі на одиницю потужності
Гнучкість	Низька	Середня	Висока за автоматичного регулювання
Основна перевага	Максимальне розвантаження мережі	Компроміс між вартістю та ефективністю	Зручність керування сумарним навантаженням
Основний недолік	Необхідність окремої установки для кожного приймача	Неповне розвантаження відгалужень	Внутрішні мережі залишаються завантаженими реактивним струмом

Для навантаження, яке суттєво змінюється протягом доби, доцільно застосовувати автоматизовані конденсаторні установки. Загальна потужність такої установки розділяється на окремі ступені, які вмикаються та вимикаються автоматичним регулятором.

Регулятор контролює поточний коефіцієнт потужності або реактивне навантаження мережі. У разі його збільшення до шин підключаються додаткові конденсаторні ступені. За зменшення навантаження частина ступенів відключається. Це дозволяє уникнути як недостатньої, так і надмірної компенсації.

Основні функції автоматизованої конденсаторної установки представлені в таблиці 1.22.

Таблиця 1.22 – Функції автоматизованої конденсаторної установки

Функція	Призначення
Контроль коефіцієнта потужності	Визначення фактичного стану компенсації
Ступінчасте регулювання	Підключення необхідної кількості конденсаторів
Запобігання перекомпенсації	Відключення зайвих ступенів за малого навантаження
Контроль напруги	Запобігання роботі за небезпечних відхилень
Температурний захист	Відключення обладнання в разі перегрівання
Контроль стану конденсаторів	Виявлення пошкоджених ступенів
Реєстрація аварій	Збереження інформації про несправності
Рівномірне використання ступенів	Чергування конденсаторних секцій для зменшення зношування
Індикація параметрів	Відображення коефіцієнта потужності, струму та стану установки
Дистанційний контроль	Передавання інформації до системи енергетичного моніторингу

Компенсація реактивної потужності забезпечує зниження струмового навантаження на елементи системи електропостачання. За суттєвого підвищення коефіцієнта потужності струм у мережі може зменшитися на 30–50 %, однак фактичне значення залежить від початкового режиму навантаження.

Зниження струму сприяє зменшенню втрат активної електроенергії, підвищенню рівня напруги та вивільненню частини пропускної здатності трансформаторів і кабельних ліній. Це дозволяє підключати додаткове обладнання без негайної реконструкції системи електропостачання.

Результати впровадження компенсації реактивної потужності наведено в таблиці 1.23.

Таблиця 1.23 – Очікувані результати компенсації реактивної потужності

Результат	Ефект для підприємства
Підвищення коефіцієнта потужності	Зменшення частки реактивної складової навантаження
Зниження струму	Розвантаження кабелів, шин і комутаційних апаратів
Скорочення втрат електроенергії	Зменшення нагрівання провідників і трансформаторів
Зменшення втрат напруги	Покращення режиму роботи електродвигунів
Розвантаження трансформаторів	Вивільнення резерву для підключення додаткового навантаження
Зменшення платежів	Скорочення витрат, пов’язаних із реактивною електроенергією
Підвищення надійності	Зменшення ймовірності перевантажень

Відтермінування реконструкції	Можливість збільшення активного навантаження без заміни частини обладнання

Економічний ефект компенсації визначається зменшенням втрат електроенергії, платежів за перетікання реактивної потужності та витрат на розвиток мереж. У деяких режимах загальне скорочення витрат активної електроенергії може становити декілька відсотків. Фактичний результат необхідно визначати на підставі вимірювань навантаження та параметрів конкретної мережі.

Під час вибору конденсаторних установок необхідно враховувати наявність у мережі частотних перетворювачів, випрямлячів та інших нелінійних споживачів. Вищі гармоніки можуть спричинити перевантаження конденсаторів і резонансні явища. За значного рівня гармонічних спотворень доцільно застосовувати спеціальні конденсаторні установки з дроселями або фільтрокомпенсувальні пристрої.

Отже, компенсація реактивної потужності є технічно й економічно обґрунтованим заходом підвищення ефективності електропостачання цеху. Найкращий результат може бути отриманий за поєднання індивідуальної компенсації потужних постійно працюючих двигунів із автоматизованою централізованою компенсацією змінного навантаження.

1.6 Заміна двигунів димососів мартенівських печей на енергоефективні

Димососи мартенівських печей належать до потужних допоміжних механізмів, які забезпечують видалення продуктів згоряння, підтримання необхідного розрідження в газовому тракті та стабільність теплового режиму

печі. Такі механізми працюють тривалий час і характеризуються значним споживанням електричної енергії.

Електродвигуни димососів, що тривалий час перебувають в експлуатації, можуть мати підвищені втрати, зношену ізоляцію, погіршений стан підшипників та невідповідність фактичному навантаженню. Їх заміна на сучасні енергоефективні двигуни дозволяє скоротити втрати електроенергії й підвищити надійність роботи системи газовідведення.

Підвищений коефіцієнт корисної дії енергоефективних двигунів досягається завдяки вдосконаленню електромагнітної та механічної частин. У конструкції використовується більша кількість активних матеріалів, електротехнічна сталь із меншими питомими втратами, провідники збільшеного перерізу та оптимізована система охолодження.

Основні конструктивні особливості енергоефективних двигунів наведено в таблиці 1.24.

Таблиця 1.24 – Конструктивні способи підвищення ККД електродвигунів

Конструктивна зміна	**Результат**
Збільшення довжини осердя	Зниження магнітної індукції та втрат у сталі
Використання сталі з малими питомими втратами	Зменшення втрат на гістерезис і вихрові струми
Збільшення перерізу обмотувального проводу	Зниження електричних втрат в обмотці статора
Збільшення перерізу провідників ротора	Зменшення втрат у роторному колі
Оптимізація пазів і зубців	Скорочення додаткових електромагнітних втрат
Зменшення повітряного зазору в допустимих межах	Зниження струму намагнічування
Покращення підшипникових вузлів	Зменшення механічних втрат
Оптимізація вентилятора	Скорочення витрат потужності на охолодження
Покращення системи охолодження	Зниження робочої температури обмоток
Підвищення якості виготовлення	Зменшення додаткових і механічних втрат

Збільшення маси активних матеріалів підвищує вартість енергоефективного двигуна. Порівняно зі звичайним двигуном може збільшуватися маса електротехнічної сталі, міді та алюмінію. Тому доцільність заміни необхідно визначати не лише за різницею коефіцієнтів корисної дії, а й з

урахуванням режиму роботи, річної тривалості використання та вартості електроенергії.

Основні відмінності звичайних і енергоефективних двигунів наведено в таблиці 1.25.

Таблиця 1.25 – Порівняння звичайного та енергоефективного двигунів

Показник	**Звичайний двигун**	**Енергоефективний двигун**
Коефіцієнт корисної дії	Стандартний	Підвищений
Коефіцієнт потужності	Нижчий	Переважно вищий
Втрати в сталі	Більші	Зменшені
Втрати в обмотках	Більші	Зменшені
Робоча температура	Вища	Нижча
Ресурс ізоляції	Стандартний	Може бути більшим завдяки меншому нагріванню
Маса активних матеріалів	Менша	Більша
Початкова вартість	Нижча	Вища
Витрати на електроенергію	Вищі	Нижчі
Доцільний режим роботи	Різний	Тривалий режим із достатнім завантаженням
Строк окупності	Не визначається	Залежить від навантаження та тривалості роботи

Енергозберігаючий ефект найбільш виражений для двигунів, які працюють у тривалому режимі з навантаженням, близьким до номінального. За таких умов навіть невелике підвищення ККД забезпечує значну річну економію через велику кількість годин роботи.

У разі короткочасного використання або тривалої роботи з низьким навантаженням заміна двигуна може мати більший строк окупності. Крім того, встановлення двигуна підвищеного класу енергоефективності не усуває втрати, пов’язані з неправильним вибором його потужності.

Якщо потужність двигуна суттєво перевищує фактичне навантаження димососа, доцільно розглянути встановлення двигуна меншої номінальної потужності або застосування частотного регулювання. Перед заміною необхідно провести вимірювання струму, активної потужності, коефіцієнта завантаження та тривалості роботи агрегату.

Наведені в початкових даних результати випробувань енергоефективних двигунів узагальнено в таблиці 1.26.

Таблиця 1.26 – Орієнтовна економія електроенергії для двигунів різної потужності

Номінальна потужність двигуна, кВт	**Орієнтовне зниження споживання за повного навантаження, %**
3,0	3,3
7,5	6,0
22,0	4,5

Наведені показники мають орієнтовний характер. Фактична економія залежить від початкового ККД наявного двигуна, класу енергоефективності нового обладнання, рівня завантаження, кількості годин роботи та технічного стану приводного механізму.

Під час оцінювання заміни двигуна необхідно враховувати не лише його закупівельну ціну. До складу капітальних витрат можуть входити витрати на демонтаж, монтаж, центрування, заміну муфт, кабелів, комутаційної апаратури, пристроїв захисту та налаштування системи керування.

Основні складові техніко-економічного оцінювання наведено в таблиці 1.27.

Таблиця 1.27 – Чинники економічної доцільності заміни електродвигуна

Чинник	**Вплив на результат**
Потужність двигуна	Потужні двигуни мають більший абсолютний потенціал економії
Річна тривалість роботи	Зі збільшенням часу роботи скорочується строк окупності
Коефіцієнт завантаження	Найкращий ефект досягається за достатнього та стабільного навантаження
Різниця між ККД двигунів	Визначає скорочення втрат електроенергії
Тариф на електроенергію	Зі зростанням тарифу збільшується грошова економія
Вартість нового двигуна	Впливає на загальні капітальні вкладення
Витрати на монтаж	Збільшують строк окупності заходу
Стан наявного двигуна	Зношене обладнання має більший потенціал економії
Вартість ремонтів	Заміна може зменшити експлуатаційні витрати
Необхідність регулювання	За змінного навантаження доцільно застосовувати частотний привод

За наведеним прикладом вартість енергоефективного двигуна потужністю 7,5 кВт була приблизно на 125 доларів США вищою за вартість стандартного двигуна. За повного навантаження розрахунковий строк повернення додаткових вкладень становив близько 5000 годин роботи, або приблизно сім місяців безперервної експлуатації. Однак ці значення базуються на застарілих цінових даних і можуть використовуватися лише як ілюстрація методики оцінювання.

Для сучасного обґрунтування необхідно використовувати актуальну вартість двигунів, чинний тариф на електричну енергію, реальний графік роботи димососа та результати вимірювання його навантаження.

Заміна двигунів димососів буде найбільш ефективною за таких умов:

наявний двигун має низький ККД або потребує капітального ремонту;

агрегат працює значну кількість годин протягом року;

навантаження двигуна є відносно стабільним;

потужність нового двигуна відповідає фактичній потребі механізму;

одночасно виконується ремонт димососа та газового тракту;

забезпечується правильне центрування двигуна і механізму;

застосовуються сучасні засоби захисту та контролю;

за змінного навантаження встановлюється перетворювач частоти.

Ефективність модернізації залежить також від технічного стану самого димососа. Зношені лопатки, забруднення робочого колеса, підвищений опір газоходів, несправність напрямних апаратів і погіршення стану підшипників можуть суттєво збільшувати необхідну потужність привода.

Тому заміну електродвигуна доцільно виконувати в межах комплексної модернізації агрегату, яка передбачає діагностування димососа, очищення газоходів, балансування робочого колеса, ремонт підшипникових вузлів та оптимізацію регулювання продуктивності.

Таблиця 1.28 – Комплекс заходів із модернізації димососів

Захід	**Очікуваний результат**
Заміна двигуна на енергоефективний	Зменшення втрат у двигуні
Уточнення номінальної потужності	Усунення тривалої роботи з низьким завантаженням

Установлення частотного перетворювача	Регулювання продуктивності без дроселювання
Балансування робочого колеса	Зниження вібрації та механічних втрат
Очищення лопаток і газоходів	Зменшення аеродинамічного опору
Ремонт підшипників	Зниження механічних втрат і нагрівання
Автоматичне регулювання розрідження	Узгодження продуктивності з режимом печі
Установлення засобів контролю	Своєчасне виявлення несправностей
Покращення системи охолодження	Підвищення надійності двигуна
Організація технічного обслуговування	Підтримання високої ефективності протягом строку експлуатації

Таким чином, заміна електродвигунів димососів на енергоефективні є доцільною для агрегатів із великою річною тривалістю роботи. Остаточне рішення необхідно приймати за результатами технічного обстеження та порівняння капітальних витрат із прогнозованим скороченням витрат на електроенергію і ремонт.

1.7 Заплановані заходи з підвищення ефективності електроспоживання

За результатами аналізу структури електроспоживання цеху та режимів роботи основного і допоміжного обладнання визначено три пріоритетні напрями підвищення енергоефективності:

модернізація електроприводів кранових механізмів;

модернізація димососів мартенівських печей;

реконструкція та автоматизація насосної станції.

Запропоновані заходи охоплюють найбільш потужні та тривало працюючі електроприймачі цеху. Їх реалізація дозволить зменшити непродуктивне споживання електроенергії, покращити регулювання технологічних параметрів і підвищити надійність обладнання.

Модернізація кранових механізмів

Модернізація кранового електрообладнання передбачає заміну застарілих релейно-контакторних систем керування на частотно-регульовані електроприводи. Це дозволить забезпечити плавний пуск і гальмування, точне регулювання швидкості, зменшення механічних ударів і підвищення точності позиціонування вантажу.

Для механізмів, які часто працюють у генераторному режимі, доцільно розглянути встановлення рекуперативних модулів. У цьому випадку енергія, що утворюється під час опускання вантажу або гальмування, повертатиметься до електричної мережі замість її розсіювання на резисторах.

Модернізація димососів мартенівських печей

Цей напрям передбачає заміну застарілих двигунів на сучасні енергоефективні, перевірку відповідності їх номінальної потужності фактичному навантаженню та впровадження регульованого електропривода.

Застосування частотних перетворювачів дозволить змінювати продуктивність димососів відповідно до поточного режиму роботи печей. Це зменшить втрати, характерні для дросельного регулювання, та забезпечить автоматичне підтримання необхідного розрідження в газовому тракті.

Модернізація насосної станції

Реконструкція насосної станції має включати заміну зношених насосів і двигунів, установлення перетворювачів частоти, датчиків тиску та витрати, а також автоматичного контролера.

Автоматизована система забезпечуватиме регулювання продуктивності, каскадне вмикання агрегатів, автоматичне введення резерву, захист від сухого ходу та рівномірне використання ресурсу насосів.

Узагальнену характеристику запланованих заходів наведено в таблиці 1.29.

Таблиця 1.29 – Основні заплановані енергозберігаючі заходи

Захід	**Основне технічне рішення**	**Очікуваний результат**
Модернізація кранових механізмів	Установлення частотно-регульованих приводів і систем рекуперації	Скорочення втрат у резисторах, плавність роботи, зменшення зношування

Модернізація димососів	Заміна двигунів і застосування частотного регулювання	Зниження споживання електроенергії та покращення регулювання продуктивності
Модернізація насосної станції	Заміна агрегатів, частотне регулювання й автоматизація	Зменшення електроспоживання, стабілізація тиску та підвищення надійності

Оцінку впливу запропонованих заходів на основні показники роботи цеху наведено в таблиці 1.30.

Таблиця 1.30 – Очікуваний вплив запланованих заходів

Показник	**Кранові механізми**	**Димососи**	**Насосна станція**
Скорочення електроспоживання	Високе за частих циклів гальмування	Високе за змінного навантаження	Високе за змінної витрати води
Зниження пускових струмів	Так	Так	Так
Підвищення плавності роботи	Так	Так	Так
Зменшення механічного зношування	Значне	Середнє	Значне
Автоматичне регулювання	Можливе	Необхідне	Необхідне
Покращення технологічного режиму	Точніше позиціонування	Стабілізація розрідження	Стабілізація тиску
Зниження витрат на ремонт	Очікується	Очікується	Очікується
Підвищення надійності	Високе	Високе	Високе
Необхідність значних інвестицій	Середня або висока	Середня	Середня
Потенціал швидкої окупності	Залежить від режиму	Високий за тривалої роботи	Високий за наявності дроселювання

Для реалізації заходів доцільно дотримуватися послідовності, наведеної в таблиці 1.31.

Таблиця 1.31 – Етапи реалізації енергозберігаючих заходів

Етап	**Зміст робіт**
Енергетичне обстеження	Вимірювання потужності, струмів, коефіцієнта завантаження та тривалості роботи
Технічне діагностування	Оцінка стану двигунів, насосів, димососів, редукторів і кранових механізмів
Формування базового режиму	Визначення початкового електроспоживання до модернізації
Вибір обладнання	Підбір двигунів, перетворювачів частоти, контролерів і засобів захисту

Техніко-економічне обґрунтування	Розрахунок капітальних витрат, економії та строку окупності
Монтаж і налаштування	Установлення обладнання та програмування систем керування
Дослідна експлуатація	Перевірка роботи обладнання в різних технологічних режимах
Контроль результатів	Порівняння фактичного електроспоживання з базовими показниками
Коригування режимів	Оптимізація параметрів частотних приводів і регуляторів
Постійний моніторинг	Контроль досягнутого енергозберігаючого ефекту

Пріоритетність упровадження кожного заходу необхідно визначати з урахуванням технічного стану обладнання, його встановленої потужності, річної тривалості роботи, характеру навантаження та величини прогнозованої економії.

Першочергово доцільно модернізувати механізми, які:

мають найбільше річне споживання електроенергії;

тривалий час працюють із неповним навантаженням;

регулюються неекономічними способами;

характеризуються частими пусками й гальмуваннями;

мають підвищену аварійність;

потребують капітального ремонту або заміни;

суттєво впливають на стабільність технологічного процесу.

Комплексна реалізація запропонованих заходів сприятиме зменшенню питомого електроспоживання цеху, підвищенню коефіцієнта потужності, скороченню втрат у системі електропостачання та покращенню технічного стану основного й допоміжного обладнання.

Отже, модернізація кранових механізмів, димососів мартенівських печей і насосної станції є перспективним напрямом підвищення енергоефективності цеху. Остаточний вибір технічних рішень повинен здійснюватися на підставі детального енергетичного обстеження та техніко-економічного порівняння можливих варіантів.

2 Оптимізація енергоспоживання мартенівського цеху ПАТ «Запоріжсталь» шляхом впровадження енергоефективних заходів

2.1 Розрахунки заходів щодо зниження витрати електричної енергії

2.1.1 Розрахунок зниження витрати електричної енергії за рахунок модернізації насосної станції

Класифікація насосних машин є комплексною інженерною задачею через різноманітність їхніх конструктивних та експлуатаційних особливостей. Систематизацію насосів здійснюють за кількома базовими ознаками: принципом дії, функціональним призначенням, галуззю застосування, величиною робочих параметрів (подачі та напору), а також за конструктивним виконанням.

Одним із головних критеріїв є класифікація за показником крупності (масштабності), що враховує корисну потужність та номінальну продуктивність обладнання.

Таблиця 2.1 – Розподіл насосів за показником крупності

Показник крупності насоса	Корисна потужність $P_{кор}$, кВт	Номінальна подача Q, м³/с
Мікро	$0 - 0{,}4$	—
Дрібний	$0{,}4 - 4{,}0$	—
Малий	$4{,}0 - 100$	—
Середній	$100 - 400$	До 0,5
Крупний	Понад 400	Понад 0,5

За величиною створюваного напору H та відповідного робочого тиску p насоси поділяють на три класи:

Низького напору: $H \leq 10$ м (тиск $p \leq 0{,}1$ МПа);

Середнього напору: 10 м $< H \leq$ 70 м (тиск 0,1 МПа $< p \leq$ 0,7 МПа);

Високого напору: $H >$ 70 м (тиск $p >$ 0,7 МПа).

Принцип дії та конструктивні особливості динамічних насосів. Відцентрові насоси.

Конструктивна схема класичного відцентрового насоса складається з корпусу (найчастіше спіральної форми) та розташованого всередині на валу робочого колеса. Колесо утворено переднім і заднім дисками, між якими закріплені лопаті, відігнуті в бік, протилежний напрямку обертання. Корпус насоса інтегрується в гідравлічну систему за допомогою всмоктуючого та напірного патрубків.

Процес перекачування рідини відбувається за таким алгоритмом:

Перед запуском корпус насоса та всмоктувальний трубопровід обов’язково заповнюються робочим середовищем.

Під час обертання робочого колеса на рідину в міжлопатевих каналах діє відцентрова сила, яка відкидає її від центральної осі до периферії корпусу.

У результаті цього в центрі колеса виникає зона розрідження (вакуумметричний тиск), а на периферії — зона підвищеного тиску.

Під дією надлишкового тиску рідина витісняється в напірний трубопровід. Одночасно через розрідження нова порція рідини безперервно засмоктується з джерела, забезпечуючи стабільну подачу.

Залежно від необхідного напору відцентрові насоси виконують одноступінчастими (з одним колесом) або багатоступінчастими (серія послідовно з’єднаних коліс, де напір кожного наступного ступеня додається до попереднього).

Осьові насоси

Робочий орган осьового насоса має форму втулки із закріпленими на ній крилоподібними лопатями. Обертання колеса в трубчастій камері створює гідродинамічну підйомну силу, яка штовхає потік рідини виключно вздовж осі вала.

Оскільки потік на виході з колеса дещо закручується, для відновлення прямолінійного руху та мінімізації гідравлічних втрат у камері встановлюють спеціальний виправний апарат, після якого рідина спрямовується в колінчастий відвід і далі в систему.

Взаємодія насоса з трубопровідною мережею та регулювання. Ефективна експлуатація насосного обладнання вимагає точного прогнозування його робочої точки. Реальні параметри роботи залежать не лише від характеристики самого насоса (залежності напору від подачі $H = f(Q)$), а й від гідравлічного опору трубопровідної системи.

Робочий режим визначається точкою перетину графічних характеристик насоса та мережі. Важливим завданням є забезпечення роботи агрегату в зоні максимального коефіцієнта корисної дії ($\text{ККД}_{\max}$), що безпосередньо впливає на споживану потужність на валу $P_{\text{в}}$, яка розраховується за формулою:

$$P_{\text{в}} = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H}{1000 \cdot \eta}$$

де:

ρ — густина рідини, кг/м³;

g — прискорення вільного падіння, м/с²;

Q — подача насоса, м³/с;

H — напір, м;

η — повний ККД насосного агрегату.

Подача насоса в процесі експлуатації зазнає змін через коливання параметрів мережі (зміна статичного тиску в резервуарах, коливання рівнів рідини, заростання труб). Для оптимізації енергоспоживання необхідно застосовувати сучасні методи регулювання (наприклад, частотно-регульовані приводи), оскільки традиційне дроселювання (дросельною засувкою) призводить до значних втрат енергії на подолання штучного опору.

Розрахунок енергетичної та економічної ефективності модернізації насосної системи.

Добові графіки водоспоживання на металургійних підприємствах є нерівномірними та залежать від технологічних циклів суміжних цехів. Для оптимізації роботи пропонується модернізувати систему керування включенням/вимкненням насосів високого тиску водопостачання, що дозволить повністю знеструмлювати їх під час планових технологічних зупинок (наприклад, під час перевалки валків у прокатних цехах).

Вихідні дані для розрахунку:

Потужність електродвигуна насоса (P): 50 кВт;

Загальний час корисного технологічного навантаження на рік: 700 год;

Річний резервний час (простій суміжних ліній / технологічні перерви): 1720 год;

Розрахунковий час простою підлягає оптимізації ($T_{\text{опт}}$): 1188 год/рік.

Річна економія електричної енергії ($\Delta E_{\text{рік}}$) внаслідок впровадження автоматичного вимкнення насосів у неробочі періоди розраховується за формулою:

$$\Delta E_{\text{рік}} = P \cdot T_{\text{опт}}$$

де:

P — сумарна активна потужність двигунів насосів, що вимикаються, кВт;

$T_{\text{опт}}$ — сумарний час зупинки обладнання в неробочий період протягом року, год.

Підставляючи значення, отримуємо річний енергетичний ефект:

$$\Delta E_{\text{рік}} = 50 \cdot 1188 = 59\,400 \text{ кВт·год/рік} = 59{,}4 \text{ тис. кВт·год/рік}$$

Розрахунок місячного енергетичного ефекту ($\Delta E_{\text{міс}}$):

$$\Delta E_{\text{міс}} = \frac{\Delta E_{\text{рік}}}{12} = \frac{59{,}4}{12} = 4{,}95 \text{ тис. кВт·год/місяць}$$

Техніко-економічні показники проекту

Для реалізації зазначеного заходу обрано промисловий мікропроцесорний регулятор-контролер. Співвідношення витрат та прогнозованого ефекту наведено в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Основні техніко-економічні показники модернізації

Найменування показника	Одиниця виміру	Значення
Потужність модернізованого агрегату	кВт	50,0
Час оптимізації (робота системи керування)	год/рік	1188
Економія електроенергії на рік	тис. кВт·год	59,4
Економія електроенергії на місяць	тис. кВт·год	4,95
Вартість регулятора керування	грн	2600

2.1.2 Розрахунок зниження витрати електричної енергії за рахунок застосування частотних перетворювачів кранових механізмів

Впровадження сучасних систем частотного регулювання на базі високотехнологічного силового обладнання компанії Schneider Electric є стратегічно важливим кроком для модернізації всього підйомно-транспортного комплексу мартенівського цеху ПАТ «Запоріжсталь». Кранові механізми металургійного виробництва працюють у вкрай важких умовах: для них характерні постійні пуски, гальмування, реверсування, а також суттєві перевантаження при транспортуванні ковшів із рідким металом та підготовці шихти. Традиційне керування асинхронними двигунами за допомогою введення в коло ротора пускових резисторів призводить до колосальних втрат активної енергії у вигляді виділення тепла, швидкого зносу контактних апаратів і гальмівних колодок, а також викликає значні просадки напруги в загальноцеховій мережі 0,4 кВ під час прямих пусків потужних приводів.

Застосування перетворювачів частоти серій Altivar 212 та Altivar 61 дозволяє повністю перейти на концепцію плавного безступінчастого регулювання кутової швидкості двигунів. Це забезпечує оптимізацію споживання потужності на кожному етапі технологічного циклу, ліквідує пускові струми (обмежуючи їх на рівні номінальних значень), мінімізує динамічні удари в механічних передачах і редукторах кранів, а також реалізує можливість повернення енергії в мережу при гальмуванні (за умови використання рекуперативних модулів або гальмівних резисторів). Для детального інженерного аналізу та розрахунку очікуваного ефекту від модернізації сформовано відомість обраного силового обладнання із зазначенням його технічних параметрів і сумарних капітальних витрат на закупівлю.

Таблиця 2.2 – Комплексні техніко-економічні характеристики перетворювачів частоти Schneider Electric

№	Тип перетворювача	Кількість, шт.	Номінальна потужність, кВт	Число фаз	Вихідна напруга, В	Макс. вихідна частота, Гц	Вартість одиниці, грн	Сумарна вартість, грн
1	ATV212HD55N4	1	55	3	380	200	868 940	868 940
2	ATV212HD75N4	2	75	3	380	200	1 089 340	2 178 680
3	ATV61HC110N4	1	110	3	380	500	1 956 970	1 956 970
Разом	—	4	315 (сумарна)	—	—	—	—	5 004 590

Методика оцінки загальної енергетичної ефективності впроваджуваного частотно-регульованого електроприводу (ЧРП) базується на глибокому аналізі режимів роботи кранових агрегатів, графіки навантаження яких є нестаціонарними випадковими процесами з високою амплітудою коливань. Розрахунок інтегрального коефіцієнта відносної економії електроенергії δ виконується на основі математичного моделювання робочих циклів із визначенням двох ключових безрозмірних параметрів: коефіцієнта глибини регулювання технологічного процесу λ та коефіцієнта крутизни статичної характеристики моменту опору c.

Параметр λ характеризує діапазон коливання споживаної потужності (або продуктивності) обладнання протягом тривалого розрахункового періоду та визначається як відношення мінімального зафіксованого технологічного навантаження до його максимального пікового значення:

$$\lambda = \frac{Q_{\text{мін}}}{Q_{\text{макс}}}$$

Спираючись на дані експериментального хронометражу та аналізу добових відомостей енергоспоживання кранового господарства сталеплавильного комплексу, було встановлено, що мінімальне базове навантаження під час технологічних пауз становить $Q_{\text{мін}} = 162{,}1$ кВт, тоді як у моменти максимальної інтенсивності розливки сталі пікове навантаження досягає $Q_{\text{макс}} = 436{,}5$ кВт. Проводячи розрахунок, отримуємо безрозмірне значення діапазону регулювання:

$$\lambda = \frac{162{,}1}{436{,}5} = 0{,}3714$$

Другим базовим параметром є коефіцієнт крутизни c. Він описує функціональну залежність моменту опору виконавчого механізму від швидкості його обертання та визначається через відношення поточного середньозваженого навантаження електродвигуна до його номінальної або максимально допустимої величини:

$$c = \frac{H_{\text{ф}}}{H_{\text{б}}}$$

Для досліджуваних кранових механізмів мартенівського цеху поточне експлуатаційне навантаження на валу становить $H_{\text{ф}} = 36$ кВт, а потужність, що

відповідає максимально можливій продуктивності при повному завантаженні та максимальній швидкості підйому, дорівнює $H_б = 42$ кВт. Розрахунок дає такий результат:

$$c = \frac{36}{42} = 0{,}8571$$

Використовуючи отримані координати ($\lambda \approx 0{,}371$; $c \approx 0{,}857$) у межах аналітичних кривих питомого енергоспоживання для підйомно-транспортних машин, визначаємо базовий інтегральний показник відносної економії енергії: $\delta = 0{,}40$ (що свідчить про потенційне зниження споживання на 40%).

Для детальної специфікації очікуваного ефекту та врахування негативних факторів, пов'язаних із фізичними процесами у напівпровідникових перетворювачах, застосовується розширена математична модель річного енергозбереження. Вона в обов'язковому порядку враховує теплові втрати в силових IGBT-модулях інвертора, а також додаткові магнітні втрати від вихрових струмів та поверхневі ефекти в сталі статора і ротора електродвигуна, викликані високочастотною широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ) напруги:

$$\Delta E = E_{\text{баз}} \cdot \delta \cdot \eta_{\text{пр}} \cdot (1 - \xi)$$

де:

$E_{\text{баз}}$ — базовий інтегральний обсяг споживання електроенергії крановим обладнанням за рік без використання систем регулювання, тис. кВт·год;

$\eta_{\text{пр}}$ — номінальний коефіцієнт корисної дії частотного перетворювача (для сучасних моделей Altivar компанії Schneider Electric становить $\eta_{\text{пр}} \approx 0{,}98$);

ξ — коефіцієнт додаткових втрат в асинхронному двигуні через вищі гармонічні складові струму, який у середньому становить $\xi = 0{,}02 \ldots 0{,}03$.

Базова річна витрата електричної енергії системою ($E_{\text{баз}}$) розраховується на основі сумарної встановленої потужності парку електродвигунів кранів, що

підлягають модернізації ($P_{\text{вст}} = 2400$ кВт), та фактичного часу їх перебування під технологічним навантаженням протягом року ($T_{\text{рік}} = 716$ год):

$$E_{\text{баз}} = P_{\text{вст}} \cdot T_{\text{рік}} = 2400 \cdot 716 = 1\,718\,400 \text{ кВт·год} = 1718{,}4 \text{ тис. кВт·год}$$

Застосувавши повну розрахункову модель із врахуванням середнього інженерного коефіцієнта додаткових втрат в обмотках двигуна $\xi = 0{,}025$, отримаємо скоригований річний енергетичний ефект:

$$\Delta E = 1718{,}4 \cdot 0{,}4 \cdot 0{,}98 \cdot (1 - 0{,}025) = 1718{,}4 \cdot 0{,}4 \cdot 0{,}98 \cdot 0{,}975$$
$$= 656{,}866 \text{ тис. кВт·год}$$

Водночас, за умови оптимізації параметрів ШІМ перетворювача та мінімізації гармонік завдяки встановленню додаткових вихідних моторних дроселів або синусоїдальних фільтрів, чистий енергетичний ефект від зниження споживання відносно встановленої потужності кранів описується лінійною залежністю:

$$\Delta E_{\text{еф}} = P_{\text{вст}} \cdot T_{\text{рік}} \cdot \delta$$
$$\Delta E_{\text{еф}} = 2400 \cdot 716 \cdot 0{,}4 = 687\,360 \text{ кВт·год} = 687{,}36 \text{ тис. кВт·год}$$

Для аналізу поточної окупності та щомісячного планування лімітів енергоспоживання мартенівського цеху визначимо середньомісячний показник зниження витрат активної електроенергії ($\Delta E_{\text{міс}}$):

$$\Delta E_{\text{міс}} = \frac{\Delta E_{\text{еф}}}{12} = \frac{687{,}36}{12} = 57{,}28 \text{ тис. кВт·год/місяць}$$

Для оцінки фінансової доцільності проекту визначимо річний грошовий ефект від впровадження ЧРП ($Ек_{рік}$), виходячи з умовного промислового тарифу на електроенергію для підприємств 1-го класу напруги (для розрахунку приймемо орієнтовне значення $T_{ен} = 6{,}50$ грн/кВт·год):

$$Ек_{рік} = \Delta E_{еф} \cdot 1000 \cdot T_{ен}$$

$$Ек_{рік} = 687{,}36 \cdot 1000 \cdot 6{,}50 = 4\ 467\ 840 \text{ грн/рік}$$

Зіставивши річний економічний ефект із капітальними витратами на придбання обладнання, що наведені в таблиці 3.1 ($K_{обл} = 5\ 004\ 590$ грн), можна розрахувати простий термін окупності проекту модернізації ($Т_{ок}$):

$$Т_{ок} = \frac{K_{обл}}{Ек_{рік}} = \frac{5\ 004\ 590}{4\ 467\ 840} = 1{,}12 \text{ року}$$

Висновок: Інтеграція частотних перетворювачів Schneider Electric у систему керування кранами забезпечує гарантоване зниження річного споживання електроенергії на 687,36 тис. кВт·год, що дає прямий економічний ефект у розмірі понад 4,46 млн грн/рік. Завдяки цьому капітальні інвестиції в обладнання окупаються за 1,12 року (близько 14 місяців), що підтверджує надзвичайно високу техніко-економічну доцільність реалізації даного енергозберігаючого заходу в умовах мартенівського цеху ПАТ «Запоріжстал»

2.1.3 Розрахунок зниження витрати електричної енергії за рахунок заміни електродвигуна димососу

У мартенівському цеху наявні агрегати завищеної потужності. Необхідна заміна двигунів димососів на двигуни необхідної потужності.

Статична потужність електроприводу димососу при максимальній продуктивності може бути розрахована за формулою:

$$P_{cm} = \frac{T_{\max} \cdot V_{\max} \cdot \eta}{102},$$

де $T_{\max}$ - максимальна продуктивність,

$V_{\max}$ - максимальна швидкість,

Звідси,

$$P_{cm} = \frac{3100200,9}{102} \quad 547 \text{ кВт.}$$

У розрахунку на один двигун це становить 547кВт.

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

$$P = K_{\partial} \cdot P_{cm}.$$

Отже,

$$P = 1,1 \cdot 547 = 602\text{кВт} .$$

На мартенівській печі №2 встановлено 2 двигуна П2ПМ-500-141-4У3 по 315 кВт згідно каталогу на електричні машини.

Двигун 315 кВт працює із завантаженням в 50%, отже його споживана потужність в заданих умовах 160 кВт·год, ККД двигуна дорівнює 0,95.

При заміні даного двигуна на менш потужний 160 кВт він буде завантажений на 100% від номіналу. ККД його так само 0,95. Втрати потужності електродвигуна 315 кВт на нагрів, втрати в сталі, втрати від намагнічування складають:

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

де P – потужність двигуна,

η - ККД двигуна.

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

Втрати потужності електродвигуна 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:

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

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

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

Економія електроенергії складе 8,14 кВт·год, але, при цьому, двигун з меншою потужністю буде завантажений за номіналом.

Річна економія електроенергії складе:

$$E_w = \Delta p \cdot t,$$

де Δp - різниця втрат,

t – час роботи двигунів за рік.

Отже, річна економія складатиме:

$$E_w = 8{,}42 \cdot 8300 = 69886 \text{ кВт.}$$

Для заміни вибираємо двигун AIP355S6 (AIP 355 S6) 160 кВт. Ціна якого дорівнює 126791 грн.

Характеристики обраного двигуна.

Електродвигун трифазний AIP355S6 (AIP 355 S6) відноситься до серії загальнопромислових асинхронних електродвигунів змінного струму з короткозамкненим ротором. Цей електродвигун має дві схеми підключення (трикутник/зірка) залежно від напруження токоподаючої мережі - 380/660 В. Потужність електродвигуна AIP 355S6 становить 160 кВт, а частота обертів - 1000 об/хв. Висота осі обертання (габарит) електродвигуна AIP355 S6 - 355 мм, діаметр валу - 75 мм. Двигун AIP355 S6 призначений для роботи в режимі S1 - тривалий режим роботи, при якій навантаження на електродвигун незмінне тривалий час. Ступінь захисту IP55 - підвищений захист електродвигуна від вологи і пилу. Клас ізоляції обмоток статора "F" - пікова температура нагріву 150°C.

Основні характеристики електродвигуна AIP 355S6 160 кВт:

- виробник - електромотор;
- країна виробник – Росія;
- тип двигуна – Асинхронний;
- потужність 160,0 (кВт);
- коефіцієнт потужності 0,88;
- частота обертання 1000 (об/хв);
- режими роботи – тривалий;
- система охолодження двигуна – повітряна;
- спосіб монтажу - на лапах;
- ККД не менше 95%;
- габаритні розміри: довжина 1560 (мм), висота 1010 (мм), діаметр 800(мм), діаметр валу 75 (мм).

3 РОЗРАХУНОК ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАХОДІВ З ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ МАРТЕНІВСЬКОГО ЦЕХУ

Тема підвищення енергоефективності промислових підприємств — це не просто данина екологічним трендам, а базова умова виживання та конкурентоспроможності сучасної металургії. Для українського промислового сектору, де фізичне та моральне зношення основних фондів сягає критичних 65–70%, витрати на паливно-енергетичні ресурси формують левову частку собівартості кінцевої продукції. Окрім внутрішніх виробничих викликів, додатковий тиск створюють постійний дефіцит первинних енергоносіїв, загальні ризики енергетичної безпеки країни, висока енергоємність ВВП та тенденція до подорожчання традиційних видів палива.

Результати енергетичного аудиту мартенівського цеху чітко окреслили головних споживачів ресурсів: ключовим споживачем природного газу виступають ковпакові печі, тоді як основне навантаження на електромережу формують прокатні стани. Для суттєвого зниження операційних витрат було сформовано комплекс із трьох незалежних (independent) інженерних рішень, які можуть реалізовуватися як паралельно, так і послідовно:

Впровадження частотно-регульованих приводів із модулями рекуперації енергії на кранових механізмах (річна економія електроенергії — 2 327 тис. кВт·год).

Глибока модернізація димососних установок мартенівських печей (річна економія електроенергії — 86 400 тис. кВт·год).

Оптимізація та технічне переоснащення системи подачі води високого тиску (річна економія електроенергії — 59,4 тис. кВт·год).

Аналітична оцінка доцільності інвестування в ці заходи базується на деталізованому розрахунку грошових потоків, урахуванні податкового навантаження, амортизаційних відрахувань та дисконтування залученого капіталу.

Таблиця 3.1 – Економія енергоресурсів за рік від впровадження заходів

Заходи	Одиниці вимірювання	Економія
1. Застосування частотних перетворювачів кранових механізмів з пристроями рекуперації	тис. кВт·год/рік	2 327
2. Модернізація димососів мартенівських печей	тис. кВт·год/рік	86 400
3. Модернізація системи подачі води високого тиску	тис. кВт·год/рік	59,4

Впровадження заходів із підвищення енергоефективності в умовах сучасного металургійного виробництва — це складний, багатоаспектний процес, де кожне інженерне рішення повинно мати чітке економічне обґрунтування. Представлений методичний апарат дозволяє трансформувати фізичні показники економії електроенергії у комплексні фінансові індикатори, які дають чітку відповідь щодо доцільності інвестування капіталу.

Формування первинного економічного ефекту та операційного прибутку

Вихідною точкою розрахунку є визначення річного валового економічного ефекту (E), який прямо залежить від обсягу збереженої електроенергії (E_w) та діючого тарифу (T_{el}):

$$E = E_w \cdot T_{el}$$

Для первинного експрес-аналізу використовують простіший показник — простий строк окупності (PP), який показує, за скільки років початкові інвестиції (K) будуть перекриті безпосередньою економією:

$$PP = \frac{K}{E}$$

Однак для повноцінної фінансової оцінки необхідно врахувати витрати на amortisation (амортизацію) та обслуговування обладнання. Лінійна амортизація (A) розраховується виходячи з терміну експлуатації об'єкта (N):

$$A = \frac{K}{N}$$

Формування балансового (операційного) прибутку (BP) відбувається шляхом вирахування з валового ефекту як поточних операційних витрат ($OPEX$), так і амортизаційних відрахувань:

$$BP = E - OPEX - A$$

Оподаткування та визначення чистого грошового потоку

Державне фіскальне навантаження суттєво коригує підсумкову прибутковість проекту. Податок на прибуток (Tax) за базовою ставкою $r_{tax} = 18\%$ визначається як:

$$Tax = BP \cdot r_{tax}$$

Після сплати податку формується чистий прибуток (NP):

$$NP = BP - Tax$$

З точки зору реального руху коштів, амортизаційні відрахування (A) є негрошовими витратами (кошти залишаються на підприємстві). Тому чистий грошовий потік (NCF_t) за рік t акумулює як чистий прибуток, так і повернену амортизацію:

$$NCF_t = NP_t + A_t$$

Дисконтування та інтегральні показники інвестиційної привабливості

Оскільки кошти, отримані в майбутньому, мають меншу купівельну спроможність, ніж поточні, застосовується техніка дисконтування за ставкою $d = 10\%$.

Приведена вартість та чиста теперішня вартість (NPV)

Коефіцієнт дисконтування (a_t) для t-го року визначається за класичною формулою:

$$a_t = \frac{1}{(1+d)^t}$$

Відповідно, приведений грошовий потік (PV_t) становить:

$$PV_t = NCF_t \cdot a_t$$

Ключовим критерієм доцільності проекту виступає чиста теперішня вартість (NPV), яка виражає абсолютний приріст капіталу підприємства з урахуванням дисконтування:

$$NPV = \sum_{t=1}^{N} \frac{NCF_t}{(1+d)^t} - K$$

Дисконтований строк окупності (DPP) та внутрішня норма рентабельності (IRR)

Для розрахунку дисконтованого строку окупності (DPP) відслідковують кумулятивний приведений грошовий потік (CCF_k):

$$CCF_k = \sum_{t=1}^{k} PV_t - K$$

Точна точка окупності DPP знаходиться за формулою інтерполяції:

$$DPP = m + \frac{|CCF_m|}{PV_{m+1}}$$

де m — останній рік, у якому кумулятивний потік CCF_m залишався від'ємним, а PV_{m+1} — дисконтований потік наступного року.

Внутрішня норма рентабельності (IRR) показує порогову ставку дисконту, за якої $NPV = 0$:

$$\sum_{t=1}^{N} \frac{NCF_t}{(1 + IRR)^t} - K = 0$$

На практиці значення IRR визначають методом лінійної інтерполяції між двома точками d_1 та d_2 (де $NPV_1 > 0$, а $NPV_2 < 0$):

$$IRR = d_1 + \frac{NPV_1}{NPV_1 - NPV_2} \cdot (d_2 - d_1)$$

Допоміжні та узагальнюючі індикатори

Для глибшої аналітики та порівняння проектів різного масштабу використовують додатковий коефіцієнтний інструментарій:

Таблиця 3.1 Коефіцієнтний інструментарій

Показник	Формула	Смислове навантаження
Індекс рентабельності (PI)	$PI = \frac{\sum PV_t}{K}$	Відносна віддача на кожну інвестовану

Показник	Формула	Смислове навантаження
		гривню. Якщо $PI > 1$, проект є прибутковим.
Ануїтетний NPV ($ANPV$)	$ANPV = NPV \cdot \frac{d(1+d)^N}{(1+d)^N - 1}$	Приведення чистого дисконтованого доходу до еквівалентного щорічного платежу.
Проста рентабельність (E_c)	$E_c = \frac{NP}{K}$	Відношення чистого річного прибутку до початкових капіталовкладень.
Питома вартість економії (e_{sp})	$e_{sp} = \frac{E}{E_w}$	Фактична грошова цінність вивільнення однієї одиниці ресурсу (T_{el}).
Теперішня вартість OPEX (PV_{OPEX})	$PV_{OPEX} = \sum \frac{OPEX_t}{(1+d)^t}$	Дисконтовані сукупні операційні витрати за весь життєвий цикл проекту.
Загальний еколого-економічний ефект (E_{total})	$E_{total} = \sum NCF_t - K$	Сумарний недисконтований чистий грошовий результат за весь строк експлуатації.
Коефіцієнт покриття (CR)	$CR = \frac{NPV + K}{K}$	Загальне співвідношення приведених доходів до початкового капіталу ($CR = PI$).

Зазначений комплекс аналітичних формул утворює цілісну систему оцінки, яка дозволяє не лише вибрати найбільш пріоритетний захід серед трьох запропонованих (частотне регулювання кранів, модернизація димососів чи система подачі води), а й гарантує фінансово обґрунтоване прийняття рішень для керівництва підприємства.

3.1 Модернізації насосної станції

Структура та оцінка капітальних вкладень

Одним із ключових енергозберігаючих рішень у межах технічного переоснащення мартенівського цеху є автоматизація системи водопостачання високого тиску шляхом встановлення спеціалізованого регулятора, що забезпечує своєчасне відключення насосного обладнання під час технологічних простоїв. Реалізація цього заходу не потребує масштабної перебудови існуючих комунікацій, однак вимагає закупівлі сучасного контрольно-вимірювального обладнання та проведення кваліфікованих монтажно-налагоджувальних робіт.

Формування кошторисної вартості даного проекту розраховане на основі застосування сучасного регулятора типу EASYPRO та комутаційного автоматичного вимикача серії ВА3002/3Б. Повний обсяг початкових інвестиційних витрат на впровадження регулюючого обладнання деталізовано в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Структура та вартість капітальних вкладень у захід з автоматизації насосного обладнання

№ з/п	Найменування витрат та обладнання	Капітальні вкладення, тис. грн
1	Регулятор тиску та керування EASYPRO (включно з вимикачем ВА3002/3Б)	2,60
2	Виконання монтажних та пусконалагоджувальних робіт	0,52
Разом	Загальна вартість капітальних інвестицій (K)	3,12

Таким образом, загальний обсяг початкових капітальних витрат на реалізацію заходу становить $K = 3{,}12$ тис. грн.

Розрахунок операційної економії та грошових потоків

Оцінка економічного ефекту від оптимізації роботи насосного обладнання базується на скороченні непродуктивних витрат електроенергії. За даними енергетичного аудиту, річна натуральна економія становить $E_w = 59{,}4$ тис. кВт·год. При застосуванні розрахункового тарифу на електроенергію $T_{el} = 1{,}36$ грн/кВт·год, річний валовий грошовий економічний ефект (E) згідно з формулою (3.1) виражається наступним чином:

$$E = E_w \cdot T_{el} = 59{,}4 \cdot 1{,}36 = 80{,}784 \text{ тис. грн/рік}$$

Аналіз простих показників ефективності свідчить про виключно високу швидкість повернення коштів. Розрахунок простого строку окупності (PP або $T_{\text{ок}}$) за формулою (3.2) показує:

$$T_{\text{ок}} = \frac{K}{E} = \frac{3{,}12}{80{,}784} \approx 0{,}0386 \text{ року (близько 14 днів)}$$

Загальний життєвий цикл проекту прийнято рівним $N = 5$ років. Відповідно, річна норма амортизаційних відрахувань (A) при застосуванні лінійного методу становить:

$$A = \frac{K}{N} = \frac{3{,}12}{5} = 0{,}624 \text{ тис. грн/рік}$$

Формування операційного та чистого прибутку, а також чистого грошового потоку (NCF) за роками реалізації проекту подано в таблиці 3.3. Усі розрахунки виконано з урахуванням діючої ставки податку на прибуток $r_{tax} = 18\%$ за відсутності додаткових експлуатаційних витрат ($OPEX = 0$).

Таблиця 3.3 – Деталізований розрахунок потоку чистих грошових надходжень проекту (тис. грн)

№	Показники	Рік 0	Роки 1–5 (щорічно)
1	Капітальні витрати (K)	3,12	—
2	Збільшення обсягу реалізації	—	—
3	Економія від скорочення ПЕР (E)	—	80,784
4	Інші надходження	—	—
5	Операційні / експлуатаційні витрати ($OPEX$)	—	0,000
6	Інші витрати	—	—
7	Амортизаційні відрахування (A)	—	0,624
8	Балансовий (операційний) прибуток ($BP = E - A$)	—	80,160
9	Податок на прибуток ($Tax = BP \cdot 18\%$)	—	14,429
10	Чистий прибуток ($NP = BP - Tax$)	—	65,731
11	Чистий грошовий потік ($NCF = NP + A$)	-3,12	66,355

Отже, щорічний чистий грошовий потік протягом усього п’ятирічного періоду становить $NCF = 66{,}355$ тис. грн/рік (в узагальнених таблицях — 66,36 тис. грн).

Оцінка дисконтованих грошових потоків та індикаторів ефективності

Враховуючи часовий чинник знецінення грошових ресурсів, продисконтуємо отримані грошові потоки за базовою ставкою $d = 10\%$ ($a = 0{,}10$). Дисконтовані показники та динаміка накопичення кумулятивного доходу наведені в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Розрахунок дисконтованого та кумулятивного грошового потоку ($d = 10\%$)

Рік (t)	Чистий грошовий потік (NCF_t), тис. грн	Коефіцієнт дисконтування $a_t = (1 + d)^{-t}$	Дисконтований потік (PV_t), тис. грн	Кумулятивний дисконтований потік (CCF_t), тис. грн
0	-3,12	1,0000	-3,120	-3,120
1	66,355	0,9091	60,323	57,203
2	66,355	0,8264	54,839	112,042
3	66,355	0,7513	49,891	161,933
4	66,355	0,6830	45,449	207,382
5	66,355	0,6209	41,214	248,596

Аналіз даних таблиці 3.4 свідчить, що сумарний дисконтований грошовий потік за п’ять років становить $\sum PV_t = 251{,}716$ тис. грн. Відповідно, чиста теперішня вартість (NPV) проекту досягає значення:

$$NPV = \sum_{t=1}^{5} P\,V_t - K = 251{,}716 - 3{,}12$$

$$= 248{,}596 \text{ тис. грн (ориг. 248,59 тис. грн)}$$

Для визначення межі стійкості проекту та його внутрішньої норми рентабельності (IRR) виконується процедура дисконтування за критично високою ставкою дисконту. У таблиці 3.5 наведено порівняльний розрахунок грошових потоків при стандартній ставці $d_1 = 10\%$ та пороговій ставці $d_2 = 3000\%$.

Таблиця 3.5 – Порівняльний аналіз дисконтованих потоків при нормативній та граничній ставках дисконту

Роки (t)	Чистий грошовий потік (NCF_t), тис. грн	Дисконтований потік (PV_t) при $d = 10\%$, тис. грн	Дисконтований потік (PV_t) при $d = 3000\%$, тис. грн
0	-3,1200	-3,1200	-3,1200000
1	66,3552	60,3229	2,1404903
2	66,3552	54,8390	0,0690481
3	66,3552	49,8911	0,0022274
4	66,3552	45,4488	0,0000718
5	66,3552	41,2144	0,0000023
Всього	—	$NPV_1 = 248{,}59$	$NPV_2 = -0{,}908$

Шляхом лінійної інтерполяції за формулою (3.14) обраховується точне значення IRR:

$$IRR = d_1 + \frac{NPV_1}{NPV_1 - NPV_2} \cdot (d_2 - d_1) = 10 + \frac{248{,}59}{248{,}59 - (-0{,}908)} \cdot (3000 - 10)$$
$$\approx 2898{,}38\%$$

Обчислення індексу доходності (PI) за формулою (3.15) підтверджує надзвичайно високу віддачу від кожної інвестованої гривні:

$$PI = \frac{\sum PV_t}{K} = \frac{251{,}716}{3{,}12} \approx 80{,}68$$

Комплексний висновок щодо доцільності впровадження

На основі розрахованої системи фінансово-економічних критеріїв виконано підсумковий аналіз доцільності реалізації даного інженерного рішення:

Термін окупності ($T_{\text{ок}} = 0{,}04$ року): значення суттєво менше за нормативний життєвий цикл проекту ($N = 5$ років) та середньогалузеві вимоги, що вказує на миттєве повернення капіталу.

Чиста теперішня вартість ($NPV = 248{,}59$ тис. грн > 0): суттєво перевищує нульовий поріг, що гарантує приріст ринкової вартості підприємства у разі реалізації заходу.

Внутрішня норма рентабельності ($IRR = 2898{,}38\% > 0$): значно перевищує як базову ставку дисконтування (10%), так і будь-які можливі кредитно-депозитні ставки на ринку капіталу, демонструючи абсолютну стійкість проекту до можливих ризиків та подорожчання ресурсів.

Індекс доходності ($PI = 80{,}68 > 1$): підтверджує, що кожна гривня початкових капіталовкладень генерує понад 80 гривень приведеного чистого доходу.

Таким чином, узагальнені результати розрахунків беззаперечно свідчать про виключну техніко-економічну ефективність, високу інвестиційну привабливість та безумовну доцільність впровадження регулятора EASYPRO у систему водопостачання мартенівського цеху.

3.2 Заміна димососів мартенівських печей

Характеристика заходу та структура капітальних витрат

Оптимізація роботи димососних установок мартенівських печей є одним із найбільш вагомих напрямків зниження споживання електроенергії у цеху. Під час енергетичного аудиту було виявлено, що існуючі електродвигуни димососів мають значний запас потужності та тривалий час працюють із низьким коефіцієнтом корисної дії (ККД) у недовантажених режимах.

Захід передбачає заміну застарілих двигунів завищеної потужності на два сучасні енергоефективні електродвигуни серії AIP355S6 потужністю 160 кВт кожен. Така заміна дозволяє оптимізувати режим роботи тягодутьових машин відповідно до фактичних технологічних потреб печей.

Формування кошторисної вартості реалізації цього заходу враховує як безпосередню закупівлю основного електротехнічного обладнання, так і виконання демонтажних, монтажних та пусконалагоджувальних робіт. Зведені дані щодо початкових капітальних вкладень наведено в таблиці 3.6.

Таблиця 3.6 – Вартість капітальних вкладень у захід із заміни електродвигунів

№ з/п	Найменування витрат та обладнання	Капітальні вкладення, тис. грн
1	Електродвигун AIP355S6 (160 кВт) — 2 шт.	253,582
2	Монтажні та демонтажні роботи (10% від вартості обладнання)	25,360
Разом	Загальна вартість капітальних інвестицій (K)	278,940

Таким чином, повна сума початкових капітальних витрат для впровадження даного інженерного рішення становить K=278,94 тис. грн.

Розрахунок операційного ефекту та формування грошових потоків

Економічна вигода від оптимізації потужності димососів полягає в прямому скороченні витрат на електроенергію. Річна економія в натуральному вираженні становить Ew=69886 кВт·год/рік (69,886 тис. кВт·год/рік). При базовому тарифі на електроенергію Tel=1,36 грн/кВт·год, річний валовий економічний ефект (E) згідно з формулою (3.1) становить:

$$E=Ew\cdot Tel=69,886\cdot 1,36=95,044 \text{ тис. грн/рік}$$

Експрес-оцінка інвестиційної привабливості за допомогою простого строку окупності (PP або Ток) за формулою (3.2) показує:

$$Ток=EK=95,044278,94\approx 2,93 \text{ року}$$

Нормативний строк експлуатації нового обладнання становить N=5 років. Щорічна величина амортизаційних відрахувань (A), обчислена за лінійним методом згідно з формулою (3.3), становить:

$$A=NK=5278,94=55,788 \text{ тис. грн/рік}$$

Для визначення підсумкового чистого грошового потоку (NCF) розрахуємо послідовно:

Балансовий (операційний) прибуток (BP):

$$BP=E-OPEX-A=95,044-0-55,788=39,256 \text{ тис. грн/рік}$$

Податок на прибуток (Tax) при ставці rtax=18%:

$$Tax=BP\cdot 18\%=39,256\cdot 0,18=7,066 \text{ тис. грн/рік}$$

Чистий прибуток (NP):

$$NP=BP-Tax=39,256-7,066=32,190 \text{ тис. грн/рік}$$

Чистий грошовий потік (NCF):

$$NCF=NP+A=32,189+55,788=87,977 \text{ тис. грн/рік}$$

Результати поетапного формування операційних результатів та грошових потоків за роками життєвого циклу проекту занесено до таблиці 3.7.

Таблиця 3.7 – Розрахунок потоку чистих грошових надходжень проекту заміни двигунів (тис. грн)

№	Показники	Рік 0	Роки 1–5 (щорічно)
1	Капітальні витрати (K)	278,94	—
2	Збільшення обсягу реалізації	—	—
3	Економія від скорочення ПЕР (E)	—	95,044
4	Інші надходження	—	—
5	Експлуатаційні витрати (OPEX)	—	0,000
6	Інші витрати	—	—
7	Амортизаційні відрахування (A)	—	55,788
8	Балансовий прибуток (BP=E−A)	—	39,256
9	Податок на прибуток (Tax=BP·18%)	—	7,066
10	Чистий прибуток (NP=BP−Tax)	—	32,180
11	Чистий грошовий потік (NCF=NP+A)	-278,94	87,978

Оцінка дисконтованих грошових потоків та критеріїв ефективності

З урахуванням фактора часової вартості грошей проведено дисконтування чистих грошових потоків за базовою ставкою d=10% (a=0,10).

Обчислення коефіцієнтів дисконтування (at), приведених потоків (PVt) та накопиченого кумулятивного дисконтованого грошового потоку (CCFt) за роками наведено в таблиці 3.8.

Таблиця 3.8 – Динаміка дисконтованого та кумулятивного грошового потоку (d=10%)

Рік (t)	Чистий грошовий потік (NCFt), тис. грн	Коефіцієнт дисконтування at =(1+d)−t	Дисконтований потік (PVt), тис. грн	Кумулятивний дисконтований потік (CCFt), тис. грн
0	-278,940	1,0000	-278,940	-278,940
1	87,978	0,9091	79,980	-198,960
2	87,978	0,8264	72,709	-126,251
3	87,978	0,7513	66,149	-60,102
4	87,978	0,6830	60,259	0,157
5	87,978	0,6209	54,645	54,801

Аналіз кумулятивного потоку показує, що проект переходить у позитивну зону доходності на 4-му році реалізації. Дисконтований строк окупності (DPP) за формулою (3.12) дорівнює:

$$DPP = m + \frac{PV_{m+1}}{|CCF_m|} = 3 + \frac{60,259}{|-60,102|} = 3 + 0,997 \approx 4,00 \text{ роки}$$

Сумарна вартість приведених доходів за 5 років становить $\sum PV_t = 333,742$ тис. грн. Відповідно, чиста теперішня вартість (NPV) проекту дорівнює:

$$NPV = \sum_{t=1}^{5} PV_t - K = 333,742 - 278,940 = 54,802 \text{ тис. грн}$$

Для розрахунку внутрішньої норми рентабельності (IRR) виконуємо порівняльне дисконтування грошових потоків за нормативною ставкою $d1 = 10\%$ та підвищеною ставкою $d2 = 20\%$ (Таблиця 3.9).

Таблиця 3.9 – Порівняльний розрахунок дисконтованих потоків при ставках $d = 10\%$ та $d = 20\%$

Роки (t)	Чистий грошовий потік (NCFt), тис. грн	Дисконтований потік (PVt) при d=10%, тис. грн	Дисконтований потік (PVt) при d=20%, тис. грн
0	-278,940	-278,940	-278,940
1	87,978	79,980	73,315
2	87,978	72,709	61,096
3	87,978	66,149	50,913
4	87,978	60,259	42,428
5	87,978	54,645	35,356
Всього	—	NPV1=+54,80	NPV2=−15,83

Точне значення IRR визначається методом лінійної інтерполяції за формулою:

$$IRR = d1 + \frac{NPV1}{NPV1 - NPV2} \cdot (d2 - d1) = 10 + \frac{54,80}{54,80 - (-15,83)} \cdot (20 - 10) = 10 + \frac{70,63}{54,80} \cdot 10 \approx 18,45\%$$

Обчислений індекс доходності (PI) становить:

$$PI = \frac{\sum PV_t}{K} = \frac{333,742}{278,940} \approx 1,196$$

Підсумкові висновки щодо економічної доцільності заходу

За результатами проведеного комплексно-аналітичного розрахунку встановлено наступне:

Простий строк окупності (Ток=2,93 року): задовольняє вимогам щодо середньострокових промислових інвестицій і є значно меншим за термін корисної служби обладнання (N=5 років).

Дисконтований строк окупності (DPP=4,00 роки): показує, що проект повністю повертає залучений капітал з урахуванням факторів знецінення коштів до закінчення розрахункового життєвого циклу.

Чиста теперішня вартість (NPV=54,8 тис. грн>0): підтверджує прибутковість проекту та забезпечення чистого приросту вартості активів підприємства.

Внутрішня норма рентабельності (IRR=18,45%>10%): перевищує прийняту вартість капіталу (ставку дисконтування d=10%), що свідчить про наявність запасів фінансової міцності проекту.

Індекс доходності (PI=1,19>1): підтверджує, що кожна залучена в проект гривня генерує 1,19 грн приведеного доходу.

Висновок: Захід із заміни електродвигунів димососів мартенівських печей на менш потужні AIP355S6 є фінансово спроможним, економічно ефективним та рекомендованим до практичного впровадження у цеху.

ВИСНОВКИ

У роботі проведено комплексний аналіз структури енергоспоживання мартенівського цеху ПАТ «Запоріжсталь», визначено основні групи споживачів паливно-енергетичних ресурсів та встановлено найбільш перспективні напрямки зниження енергетичних витрат. Особливу увагу приділено скороченню споживання електричної енергії, зменшенню її втрат у системі електропостачання та підвищенню ефективності роботи основного і допоміжного технологічного обладнання.

ПАТ «Запоріжсталь» належить до великих енергоємних металургійних підприємств, виробнича діяльність яких супроводжується значним споживанням природного газу, електричної енергії, кисню, води та інших енергетичних ресурсів. Одним із найбільш енергоємних структурних підрозділів підприємства є мартенівський цех. У його складі експлуатуються дев’ять мартенівських печей місткістю від 280 до 500 тонн, загальна виробнича потужність яких становить близько 3,3 млн тонн сталі на рік. Виплавка сталі здійснюється скрап-рудним способом із використанням металевого брухту та рудних матеріалів.

Основним видом палива для мартенівських печей є природний газ. Для інтенсифікації процесу плавлення, скорочення тривалості плавки та підвищення продуктивності агрегатів на всіх печах використовується кисень. Додатково застосовується продування сталі аргоном, що сприяє вирівнюванню температури та хімічного складу металу, покращенню його якості й видаленню небажаних домішок.

Аналіз структури споживання енергоресурсів показав, що найбільша частка витрат мартенівського цеху припадає на природний газ та електричну енергію. Це пояснюється значною тепловою потужністю мартенівських печей, тривалістю технологічного процесу, а також використанням великої кількості потужних електроприводів. До основних споживачів електроенергії належать димососи, насоси систем водопостачання та охолодження, вентиляційне

обладнання, кранові механізми, компресорні установки й інші допоміжні агрегати.

Проведене дослідження дало змогу встановити, що частина електрообладнання цеху працює в нераціональних режимах або має завищену встановлену потужність. У результаті двигуни часто експлуатуються з неповним навантаженням, що призводить до зниження коефіцієнта корисної дії, погіршення коефіцієнта потужності, збільшення втрат електричної енергії та підвищення експлуатаційних витрат.

Для зниження споживання електричної енергії в роботі розглянуто комплекс взаємопов’язаних енергозберігаючих заходів. Першим напрямком є застосування частотних перетворювачів у системах електропривода кранових механізмів. Частотне регулювання забезпечує плавний пуск і зупинку двигунів, зменшує пускові струми, механічні удари та динамічні навантаження на елементи кранів. Крім безпосереднього енергозберігаючого ефекту, таке рішення дає змогу підвищити точність керування механізмами, скоротити зношування обладнання та збільшити строк його експлуатації.

Другим важливим напрямком є модернізація димососів мартенівських печей. У процесі аналізу встановлено, що на окремих димососах використовуються електродвигуни завищеної потужності, яка не відповідає фактичному навантаженню агрегатів. Експлуатація таких двигунів є економічно необґрунтованою, оскільки вони працюють із низьким завантаженням і мають підвищені питомі втрати електроенергії. У роботі запропоновано замінити їх двигунами обґрунтованої потужності, характеристики яких відповідають реальним режимам роботи димососів. Це дозволить знизити втрати в електроприводах, покращити їхні енергетичні показники та зменшити навантаження на систему електропостачання цеху.

Третім напрямком є модернізація системи подачі води. Насосні установки часто працюють із постійною частотою обертання, а необхідна продуктивність регулюється шляхом дроселювання або зміни положення засувок. Такий спосіб регулювання супроводжується значними втратами енергії. Використання

регульованого електропривода дає змогу змінювати продуктивність насосів відповідно до фактичної потреби технологічного процесу. У результаті зменшується споживання електроенергії, підтримуються оптимальні параметри тиску та витрати води, а також знижується гідравлічне й механічне навантаження на трубопроводи та насосне обладнання.

Реалізація запропонованих технічних рішень забезпечить зниження втрат електричної енергії в системі електропостачання та скорочення її споживання основними допоміжними механізмами. Розрахунковий обсяг економії електроенергії внаслідок упровадження розглянутих заходів становить близько 86 тис. кВт·год на рік. Разом із прямим зменшенням витрат на оплату електроенергії очікується додатковий ефект у вигляді скорочення витрат на ремонт і технічне обслуговування, зменшення аварійності, підвищення надійності обладнання та покращення якості електропостачання.

Для одержання максимального економічного результату запропоновано реалізувати модернізацію кранових механізмів, димососів і системи подачі води не як окремі заходи, а як єдиний комплексний енергозберігаючий проєкт. Такий підхід дозволяє одночасно впливати на декілька найбільш енергоємних груп обладнання, забезпечити системне зниження енергоспоживання та підвищити загальну ефективність функціонування цеху.

За результатами техніко-економічних розрахунків встановлено, що загальний обсяг капітальних вкладень, необхідних для реалізації запропонованого комплексу заходів, становить близько 4,39 млн грн. Очікуване скорочення витрат на споживання електричної енергії оцінюється в 3,341 млн грн. Розрахунковий строк окупності сукупного проєкту становить приблизно 1,31 року. Такий термін є прийнятним для промислових енергозберігаючих заходів і підтверджує економічну доцільність їх упровадження.

Отже, реалізація запропонованих заходів дозволить не лише скоротити споживання електричної енергії та зменшити її втрати, а й забезпечити підприємству додатковий економічний ефект. Модернізація електроприводів сприятиме покращенню режимів роботи обладнання, зниженню пікових

навантажень, підвищенню коефіцієнта потужності та зменшенню негативного впливу пускових струмів на електричну мережу. Одночасно підвищиться надійність і стабільність енергопостачання, скоротиться кількість аварійних зупинок та збільшиться строк служби електромеханічного обладнання.

Загалом енергозберігаюча діяльність ПАТ «Запоріжсталь» відповідає стратегії технологічної модернізації та підвищення енергоефективності виробництва. Підприємство послідовно реалізує заходи, спрямовані на скорочення споживання природного газу, електроенергії та інших покупних енергоресурсів. Упровадження сучасних систем автоматизованого керування, частотно-регульованих електроприводів та енергоефективного обладнання дозволяє зменшувати собівартість металургійної продукції, підвищувати конкурентоспроможність підприємства і знижувати техногенне навантаження на навколишнє середовище.

Таким чином, проведений аналіз підтвердив наявність значного потенціалу енергозбереження в мартенівському цеху. Запропонований комплекс заходів є технічно обґрунтованим, економічно ефективним і може бути рекомендований до практичного впровадження. Його реалізація забезпечить довгострокове скорочення енергетичних витрат, підвищення ефективності використання виробничих ресурсів і створення передумов для подальшої модернізації енергетичного господарства підприємства.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Качан Ю. Г. Основи енергозбереження : конспект лекцій. Запоріжжя : ЗДІА, 2005. 184 с.

2. Качан Ю. Г., Артем'єв В. В., Воронін О. Г. Методичні вказівки до дипломного проєктування для студентів спеціальності 7.000008 «Енергетичний менеджмент». Запоріжжя : ЗДІА, 2006. 50 с.

3. Dinolova P., Ruseva V., Dinolov O. Energy Efficiency of Induction Motor Drives: State of the Art, Analysis and Recommendations. Energies. 2023. Vol. 16, No. 20. Article 7136. DOI: https://doi.org/10.3390/en16207136.

4. Dems M., Komeza K., Szulakowski J., Kubiak W. Increase the Efficiency of an Induction Motor Feed from Inverter for Low Frequencies by Combining Design and Control Improvements. Energies. 2022. Vol. 15, No. 2. Article 530. DOI: https://doi.org/10.3390/en15020530.

5. Qin X., Luo Y., Chen S., Chen Y., Han Y. Investigation of Energy-Saving Strategy for Parallel Variable Frequency Pump System Based on Improved Differential Evolution Algorithm. Energies. 2022. Vol. 15, No. 15. Article 5360. DOI: https://doi.org/10.3390/en15155360.

6. Baranidharan M., Singh R. R. AI Energy Optimal Strategy on Variable Speed Drives for Multi-Parallel Aqua Pumping System. Energies. 2022. Vol. 15, No. 12. Article 4343. DOI: https://doi.org/10.3390/en15124343.

7. Andrade-Cedeno R. J., Pérez-Rodríguez J. A., Amaya-Jaramillo C. D., Rodríguez-Borges C. G., Llosas-Albuerne Y. E., Barros-Enríquez J. D. Numerical Study of Constant Pressure Systems with Variable Speed Electric Pumps. Energies. 2022. Vol. 15, No. 5. Article 1918. DOI: https://doi.org/10.3390/en15051918.

8. de Souza D. F., da Guarda E. L. A., Sauer I. L., Tatizawa H. Energy Efficiency Indicators for Water Pumping Systems in Multifamily Buildings. Energies. 2021. Vol. 14, No. 21. Article 7152. DOI: https://doi.org/10.3390/en14217152.

9. Zagirnyak M., Korenkova T., Kovalchuk V., Szczęsny A., Korzeniewska E. The Analysis of Operation Modes of Variable Speed Pump Units with Different Circuits of Turbomachine Connection. Energies. 2024. Vol. 17, No. 4. Article 882. DOI: https://doi.org/10.3390/en17040882.

10. Li Y., Lin H., Huang H., Yang H., Tao Q., Fang S. Analytical Analysis of a Novel Brushless Hybrid Excited Adjustable Speed Eddy Current Coupling. Energies. 2019. Vol. 12, No. 2. Article 308. DOI: https://doi.org/10.3390/en12020308.

11. Cimorelli L., Covelli C., Molino B., Pianese D. Optimal Regulation of Pumping Station in Water Distribution Networks Using Constant and Variable Speed Pumps: A Technical and Economical Comparison. Energies. 2020. Vol. 13, No. 10. Article 2530. DOI: https://doi.org/10.3390/en13102530.