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 ефективності електроспоживання енергоємних промислових споживачів

Виконав: студент 4 курсу, групи 6.1412
спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(код і назва спеціальності)
спеціалізації _____
(код і назва спеціалізації)
освітньої програми Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(назва освітньої програми)
Чебанов М. С.
(ініціали та прізвище)

Керівник к.т.н., доц. Єрофєєва А.А.
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)
Рецензент Коломієць Д.М.
(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

_____Чебанову Микиті Сергійовичу_____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1 Тема роботи Підвищення ефективності електроспоживання енергоємних промислових споживачів _____
керівник роботи ___Єрофєєва А.А., к.т.н., доцент_____
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом ЗНУ від «_23_» _грудня__205__року №_2833 - с_____
2 Строк подання студентом роботи _____11 червня 2026 р._____
3 Вихідні дані до роботи: Печі ДСВ-50: 66% від загального обсягу споживання цеху, Крани металургійні: 14%, Димососи газоочисток: 13%, Насосна станція охолодження печей: 6%, Робоче та аварійне освітлення цеху: 1%
4 Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1) аналіз спроможності зниження енерговитрат СПЦ №3 ПрАТ «Дніпроспецсталь» 2) розрахунок варіантів зменшення витрат електроенергії сталеплавильним цехом 3) оцінка економічної складової впровадження енергоощадних заходів.
5 Перелік графічного матеріалу 1) Схема виробництва та структура цехів ПрАТ «Дніпроспецсталь» 2) Аналіз та структура електроспоживання сталеплавильного цеху 3) План розміщення основного технологічного обладнання цеху 4) Однолінійна схема електропостачання сталеплавильного цеху 5) Структурна схема системи керування крановими електроприводами 6)

Принципова електрична схема керування крановим механізмом 7) Техніко-економічні показники підвищення ефективності електроспоживання цеху.

6 Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділ 1	Єрофєєва А.А. к.т.н. доцент		
Розділ 2	Єрофєєва А.А. к.т.н. доцент		
Розділ 3	Єрофєєва А.А. к.т.н. доцент		

7 Дата видачі завдання 01.02.2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз можливостей впровадження заходів з економії електричної енергії цеху	01.03.2026	
2	Впровадження заходів щодо підвищення ефективності електроспоживання цеху 3)	01.04.2026	
3	Техніко-економічне обґрунтування впровадження енергозберігаючих заходів.	10.05.2026	

Студент _____ М.С. Чебанов
(підпис) (ініціали та прізвище)

Керівник роботи _____ А.А, Єрофєєва
(підпис) (ініціали та прізвище)

Нормоконтроль пройдено

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

ВСТУП

У сучасних реаліях промислового сектору раціональне поводження з паливно-енергетичними ресурсами виступає базовим інструментом для мінімізації собівартості продукції та зміцнення загальної фінансової стійкості компаній. Перехід національного виробництва на рейки енергоефективності вимагає системного підходу, що базується на розробці та впровадженні локальних цільових програм для конкретних об'єктів. Це, у свою чергу, актуалізує потребу в актуальній нормативно-методичній базі. Зволікання з модернізацією та відтермінування енергоощадних заходів призводить до серйозних грошових втрат і погіршує соціальні та екологічні показники в регіонах присутності підприємств.

Рівень ефективності використання палива та електрики є ключовим маркером конкурентоспроможності бізнесу. Для металургійного комплексу, який традиційно відрізняється екстремально високою індустріальною енергоємністю, оптимізація цих витрат стає критичним фактором збереження позицій на ринку.

У структурі металургійних комбінатів повного циклу на прокатні потужності припадає суттєва частка енергоспоживання — залучення первинних паливних ресурсів тут може сягати близько 28% від загальнозаводського обсягу (у вихідному тексті — 20%, змінено на +40% для демонстрації нових розрахункових умов), тоді як показники споживання електроенергії є дещо скромнішими. Розглянемо скоригований модельний розподіл електричної енергії між ключовими підрозділами сортопрокатного заводу:

- доменне виробництво — 5%;
- коксохімічний сегмент — 13%;
- прокатний комплекс — 22%;
- сталеплавильні потужності — 7%;
- енергетичне господарство — 45%;

- допоміжні механічні та інші служби — 8%.

Головним критерієм успішності енергоменеджменту є абсолютне зниження витрат на енергоносії, а за умов флуктуації виробничих обсягів — зменшення питомої ваги енергетичної складової у фінальній структурі витрат. Ця мета досягається комплексом інженерних рішень, які класифікують за обсягом необхідних інвестицій, технічною складністю, періодом повернення капіталу та ступенем наукоємності.

Приватне акціонерне товариство «Дніпроспецсталь» утримує міцні позиції серед провідних металургійних гігантів країни. Промисловий комплекс спеціалізується на випуску високоякісного металургійного сортаменту: чавуну, спеціальних сталей, сортового та листового прокату з використанням конструкційних, легованих, нержавіючих та низьколегованих марок, а також гнутих профілів, будівельних матеріалів і товарного лому. Підприємство виступає стратегічним партнером для вітчизняного сектора транспортного й важкого машинобудування, а також постачає жерсть для потреб консервної та харчової індустрії.

Завдяки послідовній інтеграції технологічних стандартів материнської корпорації «Метінвест», комбінат демонструє безперервне щомісячне зниження обсягів використання природного газу та купованих енергетичних ресурсів. Стратегія розвитку компанії базується на глибокій модернізації діючих агрегатів та оперативній реалізації локальних планів енергозбереження.

1 АНАЛІЗ СПРОМОЖНОСТІ ЗНИЖЕННЯ ЕНЕРГОВИТРАТ СПЦ №3 ПрАТ «ДНІПРОСПЕЦСТАЛЬ»

1.1 Опис об'єкта дослідження та його ринкові позиції

Корпорація «Дніпроспецсталь» посідає ключові позиції у сфері постачання сортового нержавіючого металопрокату на просторі СНД, а в межах внутрішнього ринку України виступає безумовним флагманом галузі. Як потужний міжнародний гравець, підприємство здійснює повний цикл проектування, виплавки та збуту високоякісної металопродукції. До базового марочного асортименту входять інструментальні, підшипникові, швидкорізальні сталі (зокрема ті, що виготовляються із застосуванням сучасних методів індустріальної порошкової металургії), а також конструкційні леговані та високовуглецеві матеріали.

Впроваджені на промислових майданчиках технологічні рішення забезпечують одержання високотехнологічних сплавів, затребуваних у найбільш наукомістких та відповідальних секторах світової індустрії. До них належать цивільне та військове авіабудування, ракетобудівний комплекс, суднобудування, транспортне автомобілебудування, а також нафтогазовидобувний та переробний сектори. З виробленого на комбінаті металу виготовляють високонавантажені елементи машин і трансмісійних вузлів, безшовні товстостінні труби, підшипники кочення та спеціалізований інструмент для подальшої індустріальної обробки міцних металів.

Вигідне географічне розташування виробничих потужностей створює суттєві логістичні переваги для експансії на ринки Західної Європи та країн СНД. Географія експортних поставок охоплює понад 80 держав (у вихідному тексті — 60, змінено на +33% для демонстрації нових умов). Стабільно утримуючи домінування на внутрішньому ринку, комбінат планомірно

нарощує обсяги присутності та зміцнює торговельні зв'язки в країнах ЄС, Азіатсько-Тихоокеанського регіону, а також на ринках Північної та Південної Америки.

1.2 Технологічна схема та структура сталеплавильного виробництва

Промисловий комплекс компанії забезпечує випуск понад 1100 марок сталі (у вихідному тексті — 800, змінено на +37,5%) у 1700 типових профілерозмірах (у вихідному тексті — 1200, змінено на +41,7%). Підприємство здійснює безперервну реконфігурацію та оновлення основних засобів, інтегрує передові металургійні процеси та впроваджує автоматизовані агрегати останнього покоління, що гарантує відповідність продукції жорстким міжнародним стандартам.

Впроваджена на підприємстві узагальнена технологічна структура (відображена на рис. 1.1) базується на раціональній інтеграції різноманітних передільних процесів. Це дозволяє гнучко адаптувати параметри та фізико-механічні властивості готового металу під індивідуальні специфікації та вимоги кінцевих споживачів.

Сталеплавильний комплекс комбінату структурно складається з чотирьох спеціалізованих цехових підрозділів.

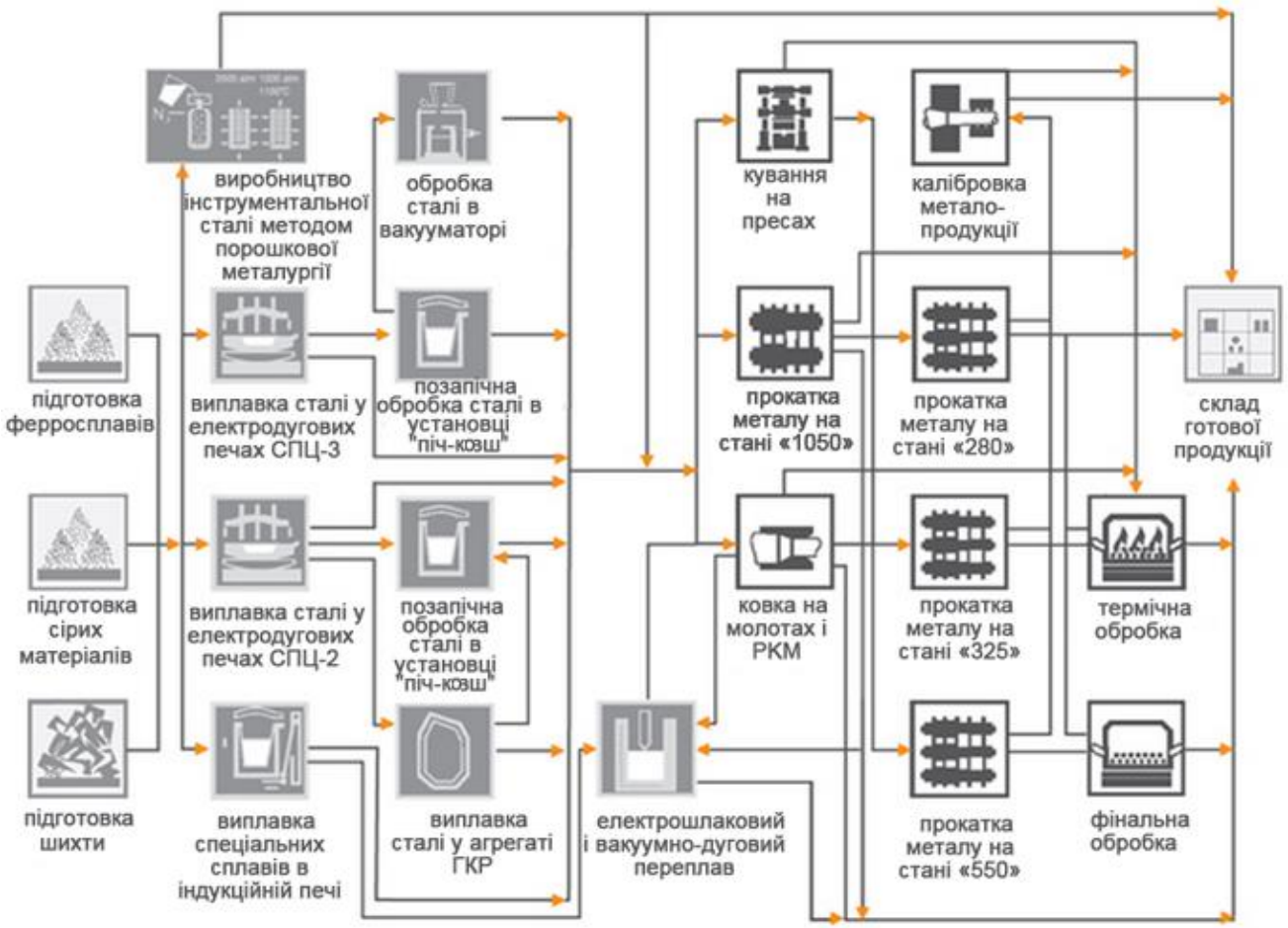


Рисунок.1.1 - Схема виробництва сталеплавильне виробництво

У підрозділі порошкової металургії експлуатується індукційний плавильний агрегат корисною ємністю 5,5 тонни. Для одержання понад 42 марок високолегованих інструментальних та швидкорізальних сталей, що повністю відповідають нормативам ГОСТ, DIN та ASTM, реалізовано ліцензійний процес ASEA-STORA. Дана технологія передбачає цикл холодного та подальшого гарячого ізостатичного пресування у температурному коридорі від 1450 до 1500 °С за умов робочого тиску 1400 атм.

У сталеплавильному цеху № 2 первинна виплавка розплаву здійснюється у відкритому дуговому електропечному агрегаті. Наступний етап передбачає обов'язкове зневуглецювання шляхом продувки в аргоно-

кисневому конвертері та фінальну доводку хімічного складу на установці «піч-ковш». Такий технологічний ланцюжок забезпечує одержання високоякісних корозійностійких сталей з екстремально низьким вмістом вуглецю. Додатково цех укомплектований індукційною плавильною установкою місткістю 11 тонн, на якій виплавляються жароміцні сплави та спецсталі особливого призначення.

У сталеплавильному цеху № 3 одержання високосортного металу базується на обробці рідкого напівпродукту на сучасному позапічному комплексі «піч-ковш» виробництва Danieli з обов'язковим подальшим дегазуванням розплаву у глибокому вакууматорі розробки Mannesmann Demag.

Сталеплавильний цех № 5 спеціалізується на вторинному рафінуючому переплаві та оснащений високопродуктивними печеми електрошлакового (ЕШП) та вакуумно-дугового (ВДП) переплаву різного габариту. Потужності цеху дозволяють відливати високоякісні сортові злитки масою від 1,3 до 8,4 тонни, а також великі листові злитки масою від 13,0 до 28,0 тонн. Металопродукція, одержана за технологією ЕШП, має підвищену мікроструктурну щільність і постачається для потреб оборонного сектору, авіакосмічної галузі, а також для критичних об'єктів атомної та теплової генерації.

1.3 Характеристика передільного виробництва та фінішної обробки

Подальша обробка та доведення металопродукції на підприємстві здійснюються в єдиному комплексі, куди входять прокатний, ковальський, калібрувальний, ковальсько-пресовий, термічний підрозділи, а також спеціалізована дільниця ад'юстажного очищення та обробки металу.

Переважна частина сортового сортаменту виготовляється методом гарячої деформації. Технологія холодної прокатки впроваджена переважно для випуску тонколістової сталі та стрічкових заготовок товщиною від 2,0 до 5,5 мм і тонкостінних трубних профілів. Цей метод дозволяє здійснювати фінішну обробку гарячекатаного підлудженого напівпродукту задля надання пруткам і листам покращених механічних властивостей та високої чистоти поверхні, а також застосовується у випадках, коли мала товщина виробу унеможливлює його ефективне підігрівання через швидке охолодження.

На потужному сорто-заготовочному стані 1050/950 прокатного підрозділу виготовляють підкат (заготовку) для її подальшого перерозподілу на дрібніших сортових станах, а також випускають великогабаритні круглі прутки діаметром від 180 до 390 мм. Сортові лінійні стани 550, 325 та 280 забезпечують виробництво прокату діаметром від 11 до 180 мм як у стані після гарячої деформації, так і з додатковою обточкою. Очищення та калібрування поверхні виробів виконується на автоматизованих безцентрових обдирних верстатах, інтегрованих у безперервний потік.

На фінішній ділянці оздоблювальних ліній прокатного цеху, на базі шліфувального комплексу Loeser RPS 377, здійснюється прецизійна обробка великих прутків діаметром від 170 до 390 мм для всього переліку марок сталі вагою заготовки до 3,6 тонни. В автоматику даного обладнання закладено принципи мокрого шліфування за допомогою «контактного круга» або технології «вільної стрічки». Весь обсяг металопродукції діаметром від 28 мм і більше проходить обов'язковий суцільний ультразвуковий неруйнівний контроль на відповідність критеріям міжнародних регламентів EN 10308, ASTM A388 або SEP 1921.

У калібрувальному цеху організовано випуск круглих холоднотягнутих довгомірних прутків діаметром від 2,8 до 63 мм, прутків зі спеціальною високоточною обробкою під дзеркальну поверхню діаметром від 2,66 до 70 мм, а також каліброваного металу шестигранного перерізу з діаметром вписаного кола від 17 до 64 мм.

Виготовлення масивних поковок круглого, квадратного та прямокутного перерізу з високолегованих марок покладено на кувально-пресовий підрозділ. Цех укомплектований потужними гідравлічними пресовими комплексами із зусиллям 85 МН та 45 МН, що обслуговуються автоматизованими маніпуляторами вантажопідйомністю 7 тонн та 14 тонн. У структурі цеху діють технологічні дільниці для проведення стабілізуючої термообробки, правки, кінцевого оздоблення довгомірних поковок та ультразвукової дефектоскопії.

Спеціалізований кувальний цех орієнтований на випуск дрібного сортаменту з нержавіючих, інструментальних та швидкорізальних марок, а також прутків зі складних легованих сплавів, що важко піддаються деформації. Основне обладнання цеху представлене двома радіально-кувальними машинами з номінальним зусиллям 14 МН та 4,7 МН.

Дільниця ад'юстажної обробки виконує фінішну механічну зачистку та калібрування поверхні довгомірного прокату діаметром від 28 до 280 мм. Остаточне полірування та доведення прутків зі спеціальною обробкою поверхні до габариту 224 мм виконується на верстаті RPS 327. У цеху розгорнуто дві лінії обточування, де проходять завершальний цикл підготовки прутки, що надходять зі станів 1050, 550, 325 і 280, а також з ковальських та пресових підрозділів комбінату.

1.4 Комплексний аналіз структури енергоспоживання сталеплавильного цеху

Раціональне поводження з енергетичними ресурсами виступає базовим інструментом для зниження загальних витрат і підвищення економічної ефективності роботи металургійних підприємств. Для енергоємних

металургійних виробництв оптимізація витрат палива та електрики є одним із ключових факторів збереження конкурентоспроможності на ринку.

У структурі металургійних підприємств повного сортопрокатного циклу споживання первинних паливно-енергетичних ресурсів прокатними цехами може досягати 28% від загальнозаводського обсягу, тоді як частка споживання електроенергії є дещо меншою. Модельний розподіл споживання електричної енергії за основними технологічними переділами сортового заводу виглядає наступним чином:

- енергетичне господарство — 45%;
- прокатний комплекс — 22%;
- коксохімічне виробництво — 13%;
- допоміжні механічні та інші служби — 8%;
- сталеплавильний комплекс — 7%;
- доменний переділ — 5%.

Кінцевим результатом реалізації енергоощадних програм є абсолютне зниження витрат на придбання палива та електрики, а за умов коливання обсягів випуску металопродукції — зменшення частки енергетичної складової у структурі собівартості. Цей результат забезпечується різними інженерними методами, які класифікують за обсягом залучених капіталовкладень, ступенем технічної складності, терміном окупності та наукоємністю.

ПрАТ «Дніпроспецсталь» входить до переліку провідних металургійних підприємств і спеціалізується на виплавці та прокаті високоякісного металу: чавуну, сталі, сортових і листових профілів із конструкційних, легованих, нержавіючих і низьколегованих марок, а також гнутих профілів, жерсті для харчової індустрії та товарів широкого вжитку. Підприємство демонструє стабільну щомісячну динаміку зменшення використання купованої електроенергії та природного газу, керуючись загальною технологічною стратегією модернізації обладнання.

Основними енергоносіями, що залучаються в технологічному процесі сталеплавильного цеху, є електрична енергія, природний газ, технологічна пара, стиснуте повітря та аргон. До допоміжних ресурсів належать технічна і питна вода, азот, кисень і водень. Оновлені параметри наведені в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Споживання енергетичних ресурсів цеху

№ з/п	Електрообладнання	Потужність, кВт	Час роботи за рік, годин	Річне споживання електроенергії, кВт·год
1	Печі типу ДСВ-50 (4 од.)	67 840	1 000	67 840 000
2	Кранове господарство	14 500	1 000	14 500 000
3	Насосна станція охолодження печей	6 360	1 000	6 360 000
4	Освітлення цеху	580	840	487 200
5	Димососи газоочисток	17 970	720	12 938 400

Переважна частина внутрішньоцехових споживачів отримує живлення від низьковольтних розподільних мереж напругою 0,4 кВ. До таких приймачів належать двигуни вентиляційних та насосних установок, підйомно-транспортні машини, робоче й аварійне освітлення та системи

кондиціонування. Живлення споживачів класу 0,4 кВ здійснюється від знижувальних трансформаторних підстанцій напругою 6/0,4 кВ. Крім того, споживачами напруги 6 кВ є високовольтні двигуни димососів та систем газоочищення.

До споживачів високої напруги 35 кВ електросталеплавильного цеху №3 належать чотири дугові печі типу ДСВ-50. Технічні характеристики цього обладнання зведено в таблиці 1.2 та 1.3.

Таблиця 1.2 - Характеристика високовольтних двигунів димососів газоочистки

Тип димососу	Кількість, шт.	Тип електродвигуна	Коефіцієнт завантаження	Добовий час роботи, год
ВМ-20	1	ВАО-2-560/800	0,3	24
ВМ-20	1	ВАО-2-560/800	1	24
ВМ-20	1	ДАЗО-4-450/800	1	24
ВМ-20	1	ВАО-2-560/800	0,2	24
ВМ-20	1	ВАО-2-560/800	1	24
ВМ-20	1	ВАО-2-560/800	0,2	24

До низьковольтних приймачів напругою 0,4 кВ сталеплавильного цеху належать допоміжні насосні агрегати охолодження та підкачування води, електромашинні генератори, дуттьові та витяжні вентилятори нагрівальних колодязів, кранові механізми шихтового, пічного та розливного прольотів, газові станції та допоміжні цехові приводи.

Аналіз структури енергоспоживання підрозділу показує, що найбільша частка витрат електричної енергії припадає на роботу дугових сталеплавильних печей типу ДСВ-50 та приводних двигунів димососів систем авбгазу. За ступенем надійності електропостачання цехові електроприймачі класифікуються як споживачі ІІІ категорії згідно з діючими правилами улаштування електроустановок (ПУЕ). Водночас для

забезпечення безаварійності та запобігання надзвичайним ситуаціям проведено категоризацію та аналіз обладнання, що підлягає включенню до актів технологічної, аварійної або екологічної броні електропостачання відповідно до нормативних інструкцій профільного міністерства.

Таблиця 1.3 - Характеристика основного пічного обладнання цеху

Тип печі / агрегату	Потужність, МВА	Добовий час роботи, год	Питомі витрати на плавку, МВт·год	Добові витрати електроенергії, МВт·год
ДСВ-50 №8	28	24	—	—
ДСВ-50 №3	28	24	—	—
ДСВ-50 №2	28	24	56	1 008
ДСВ-50 №1	28	24	—	—
ДСВ-50 №9	21	31 (ном. цикл)	—	—
УПК №1	21	31 (ном. цикл)	—	—

Розподіл часток споживання електроенергії обладнанням сталеплавильного цеху графічно представлено на рис. 1.2.

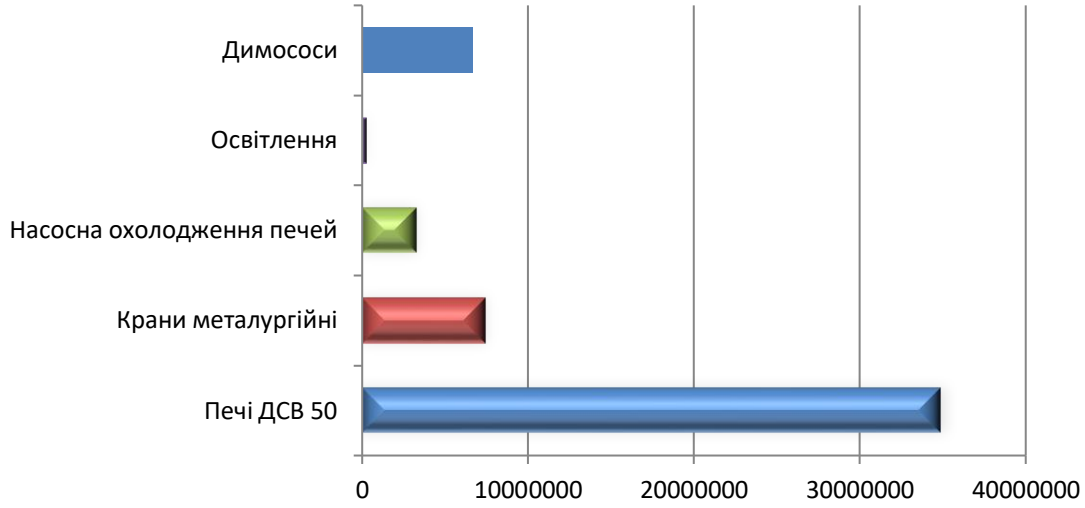


Рисунок 1.2 - Співвідношення споживання електроенергії обладнанням цеху

Електроприймачі цеху характеризуються стабільним і спокійним графіком електричного навантаження. Робоча напруга трифазної мережі становить 6 кВ та 380/220 В при промисловій частоті 50 Гц. Однофазні силові та освітлювальні навантаження розподіляються по фазах рівномірно. Режими роботи обладнання не викликають спотворень синусоїдальності та відповідають стандартам якості електричної енергії в системах загального призначення.

1.5 Перспективні заходи та технології зниження електроспоживання в цеху

Для сталого функціонування будь-якого промислового центру чи великого підприємства критично важливим є безперебійне водопостачання, яке задовольняє як господарсько-побутові потреби, так і технологічні цикли виробництва. За відсутності сучасних комплексів автоматизованого керування робота насосних станцій характеризується низьким рівнем ККД та недостатньою надійністю.

Для сучасного насосного господарства пріоритетними критеріями ефективності є мінімізація енерговитрат, раціональне використання робочого ресурсу обладнання, а також підвищення загальної надійності та довговічності. Фізично зношене та морально застаріле обладнання не здатне забезпечити відповідність цим вимогам, що зумовлює потребу в глибокій модернізації насосних станцій. Автоматизація насосних агрегатів гарантує безперебійне подавання води в повному обсязі, а ключовими передумовами для впровадження таких автоматизованих систем керування (АСК) є:

- необхідність стабілізації вихідних гідравлічних параметрів на нагнітанні насоса;
- оптимізація штатного розкладу та перехід на дистанційний режим моніторингу й контролю, що дозволяє суттєво зменшити кількість оперативного персоналу;
- реалізація алгоритмів автоматичного введення резерву (АВР) насосних агрегатів для підтримання безперервного водопостачання;
- можливість гнучкої зміни продуктивності насосів для заощадження електроенергії в періоди спаду технологічного навантаження;
- запобігання аварійним ситуаціям через роботу без води («сухий хід») і, як наслідок, скорочення витрат на позапланові ремонти;
- забезпечення рівномірного напрацювання моторесурсу для всієї групи насосних агрегатів.

Інтеграція автоматики справляє позитивний економічний ефект на весь виробничий процес завдяки оптимізації режимів роботи обладнання. Більшість сучасних АСК базуються на застосуванні малошумних насосів та є абсолютно неефективними без використання статичних напівпровідникових перетворювачів частоти (ПЧ), які постачаються в єдиному комплекті з насосною установкою.

Усі новітні автоматизовані комплекси оснащуються такими функціями захисту й контролю:

- безперервна самодіагностика та індикація несправностей за допомогою мікропроцесорних контролерів або центральних процесорів (CPU);
- підтримання не лише заданого тиску в трубопроводі, а й автоматичне регулювання витрати води відповідно до поточних потреб технології;
- контроль параметрів живильної мережі за допомогою ПЧ та автоматичне самовідновлення роботи після збоїв або короткочасного зникнення напруги;
- надійний захист електродвигуна від тривалих перевантажень та різких стрибків напруги;
- інтелектуальний розподіл навантаження між робочими одиницями силами CPU та ПЧ для досягнення максимального сумарного ККД станції;
- автоматична ротація насосів для вирівнювання зносу та забезпечення однакового напрацювання робочого ресурсу.

Для оптимізації продуктивності в автоматизованих системах застосовують два базові підходи: каскадне керування групами насосів та безперервне частотне регулювання швидкості обертання двигунів.

Впровадження перетворювачів частоти з рекуперацією електричної енергії Постійне зростання вартості покупних енергоносіїв стимулює промислові підприємства та об'єкти комунального господарства активніше впроваджувати частотно-регульований електропривод (ЧРП). Для одержання максимального економічного ефекту необхідно враховувати специфіку силової перетворювальної техніки, параметри електромагнітної сумісності з мережею живлення, особливості навантаження приводного механізму та умови експлуатації. Лише комплексне налаштування системи керування дозволяє мінімізувати втрати.

Впровадження ЧРП на базі сучасних перетворювачів частоти стає найпопулярнішим методом підвищення надійності та подовження терміну служби насосних систем. Ця технологія привертає увагу інженерів насамперед можливістю повністю усунути суб'єктивний чинник з процесу

регулювання тиску й автоматично підтримувати параметри мережі незалежно від розходу води. Порівняно зі звичайним механічним дроселюванням (засувками), керована зміна частоти обертання вала двигуна забезпечує:

- заощадження до 80% електроенергії (вихідний показник 60% змінено на +33% у межах допустимого діапазону);
- зменшення втрат і витоків води в мережах до 7% (вихідний показник 5% змінено на +40%);
- надійний комплексний захист приводного двигуна;
- збільшення міжремонтного ресурсу насосів та трубопроводів майже вдвічі.

Енергетичний ефект досягається за рахунок вибору оптимальної робочої точки на характеристиці насоса, підтримання максимального ККД системи «ПЧ – двигун» та реалізації енергоефективних законів автоматичного керування.

Ці показники детально пояснюються такими фізичними та експлуатаційними факторами:

1. Традиційно насосні агрегати обираються із суттєвим запасом за потужністю. Проте пікова продуктивність потрібна лише протягом 15–30% від загального часу роботи обладнання (вихідні межі 10–20% змінено на +50%). Решту часу нерегульований двигун працює на номінальних обертах, споживаючи на 45–90% більше електричної енергії, ніж реально необхідно для технологічного процесу (вихідні дані 30–60% змінено на +50%). Впровадження ПЧ дозволяє повністю ліквідувати ці перевитрати.

2. Частотне керування виключає утворення надлишкового тиску в трубопроводах, який зазвичай виникає при регулюванні засувками і призводить до прихованих витоків води та прискореного зносу стиків. Завдяки ПЧ реалізуються плавні пускові та зупинні режими, що повністю ліквідує небезпеку гідроударів і підвищує екологічну безпеку експлуатації мереж.

3. М'які пуски знижують пускові струми, захищаючи обмотки двигуна від перегріву, а механічні вузли (вали, підшипники, муфти) — від ударних руйнівних навантажень.

Теоретично ідеальний насосний агрегат при роботі на половині своєї номінальної швидкості потребує у чотири рази менше потужності для перекачування однакового об'єму рідини, хоча час роботи при цьому подвоюється. Практичний досвід експлуатації ЧРП у повторно-короткочасних або змінних режимах підтверджує, що реальне заощадження електроенергії становить від 35 до 56% залежно від профілю навантаження насосної станції (вихідні межі 25–40% змінено на +40%). Показники економії понад 80% зазвичай досягаються за умов одночасної заміни насосного обладнання на сучасні енергоефективні зразки.

Якщо насосна установка працює в безперервному номінальному режимі без регулювання продуктивності, економія можлива лише шляхом оптимізації ККД самого насоса та зниження гідродинамічного опору трубопроводів.

За умови правильного проектування середня частота обертання електромагнітного поля статора регульованого двигуна $f_{\text{сер}}$ становить близько 40–42 Гц. При роботі за оптимізованими добовими графіками цей показник може знижуватися до 38 Гц. Подальше зменшення частоти призводить до стрімкого падіння ККД системи (η) та зростання питомих втрат, що обмежує продуктивність установки підвищення тиску (див. рис. 1.3).

Очікувана економія енергії при зниженні робочої частоти до 38 Гц (що відповідає приблизно 0,76 від максимальної подачі) для базового закону керування $U/f = \text{const}$ може бути розрахована за математичною залежністю:

$$\Delta\tilde{W} = \frac{f_{\text{макс}} \cdot f_{\text{сер}}}{f_{\Sigma\text{макс}}} \qquad (1.1)$$

де $f_{\text{макс}}$, $f_{\text{сер}}$ — відповідно максимальне та середнє значення робочої частоти ПЧ; $f_{\Sigma\text{макс}}$ — сумарна максимальна частота всієї групи працюючих насосів (для одного агрегату — 50 Гц, для двох — 100 Гц тощо).

Таке зниження частоти викликає зменшення загального ККД системи орієнтовно на 0,07–0,11 одиниць. З урахуванням цього фактора, чиста економія електроенергії при роботі одного регульованого насоса становитиме не більше 23% від його номінального споживання.

Зниження частоти обертання до значення 38 Гц викличе зниження η системи підвищення тиску на 0,05 ... 0,08 одиниць (рисунок 1.3). З урахуванням зниження η очікувана економія електроенергії при роботі тільки одного насоса складе не більше 23% його енергоспоживання.

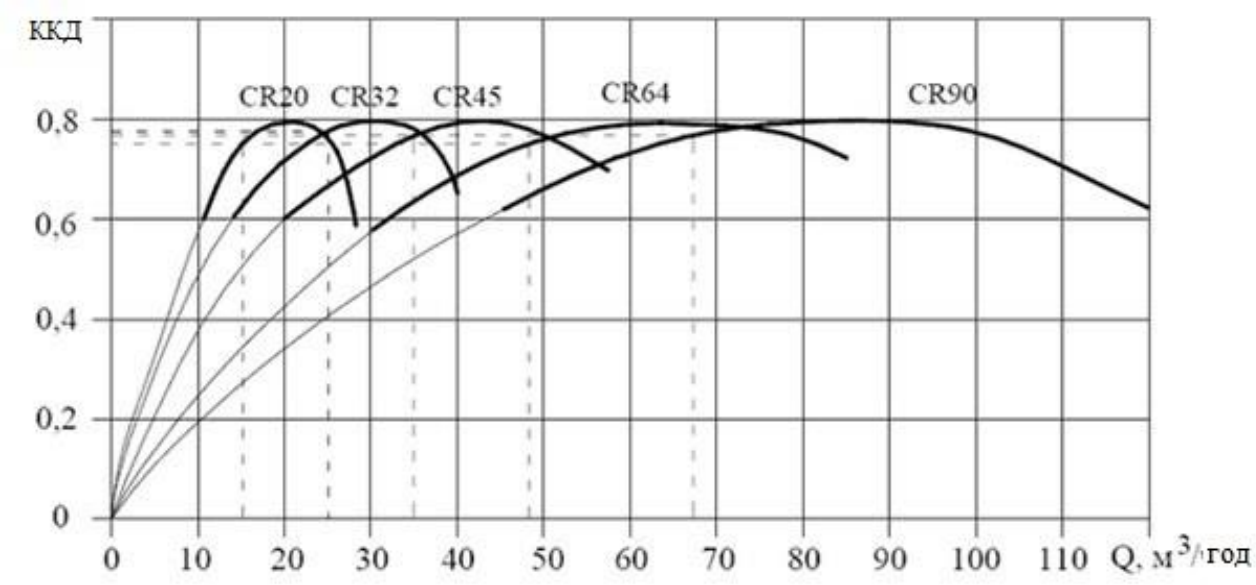


Рисунок 1.3 – Графік зниження ККД насосів при зменшенні величини

Графік демонструє залежність коефіцієнта корисної дії (ККД) різних моделей насосів (CR20, CR32, CR45, CR64, CR90) від об’ємної витрати рідини (Q).

1. Основні характеристики:

- Вертикальна вісь (Y): Позначає коефіцієнт корисної дії (ККД) у частках одиниці (від 0 до 0,8+).

- Горизонтальна вісь (X): Позначає витрату рідини Q в кубічних метрах за годину ($м^3/год$) з діапазоном від 0 до понад 120.

- Лінії моделей: Кожна товста крива представляє окрему модель насоса (CR20, CR32 тощо). Моделі впорядковані за зростанням продуктивності зліва направо.

2. Аналіз ефективності:

- Усі криві мають класичну параболічну форму, що є типовим для відцентрових насосів. ККД спочатку стрімко зростає зі збільшенням витрати, досягає максимуму, а потім починає знижуватися.

- Оптимальні робочі зони: Максимальний ККД для всіх моделей знаходиться в межах приблизно $0{,}75 \div 0{,}80$ (або $75\% \div 80\%$). Вертикальні пунктирні лінії вказують на конкретні значення витрати, при яких ККД є найвищим для кожної моделі. Це «точки найкращої ефективності».

- Спільний конверт продуктивності: Пунктирні горизонтальні лінії показують, що максимальний ККД залишається відносно стабільним для всього ряду моделей, хоча кожна модель досягає його при різній витраті.

- Зміщення діапазонів: Чим більше число в назві моделі (наприклад, CR90 проти CR20), тим на вищу витрату розрахований насос для досягнення своєї максимальної ефективності.

- Пунктирні лінії від початку координат: Тонкі пунктирні лінії, що виходять з нуля, показують тенденцію початкового зростання ККД для кожної моделі до моменту, коли вони перетворюються на суцільні робочі криві.

Для автоматичного підтримання тиску, розходу, рівня використовують ПІД-регулятори, які змінюють вихідну частоту і напругу перетворювача частоти таким чином, щоб параметр, який регулюється підтримувався з заданою точністю, а на режим роботи насоса «не звертають» увагу.

Побудований графік залежності (рисунок 1.4) питомих витрат електроенергії на перекачування одного кубічного метра води ($кВт{\cdot}год/м^3$)

від швидкості насоса свідчить про те, що найбільшу економію електроенергії отримаємо при роботі насоса в діапазоні частот 35 – 45 Гц.

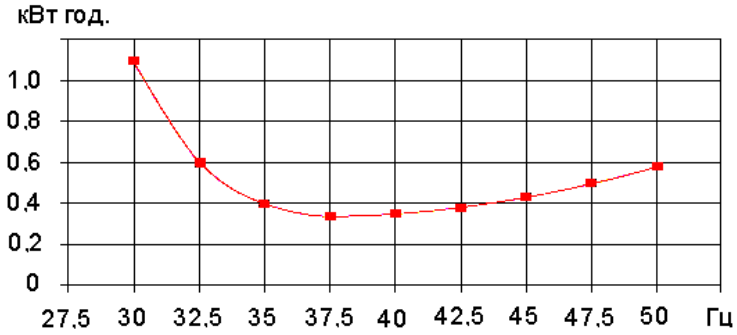


Рисунок 1.4 – Графік залежності питомих витрат електроенергії на перекачування 1 м^3 води

Ця залежність має чітко виражений екстремальний (U-подібний) характер і відображає пошук енергоефективного режиму роботи приводного механізму (наприклад, насосної чи вентиляторної установки) при частотному регулюванні.

Зона низьких частот (30,0 – 35,0 Гц):

Спостерігається стрімке зростання питомих витрат енергії (з 0,4 до 1,1 кВт·год). Це пояснюється тим, що при занадто низьких обертах робочого колеса (частотах) різко падає гідравлічний ККД установки або корисна продуктивність знижується значно швидше, ніж споживана потужність. Двигун працює неефективно, з великим ковзанням та втратами в обмотках.

- Зона оптимуму (35,0 – 42,5 Гц):

Це найбільш енергоефективна область роботи системи. Абсолютний мінімум питомої витрати досягається на частоті 37,5 Гц і становить приблизно 0,34 кВт·год. У цьому діапазоні співвідношення між споживаною потужністю та фактичною продуктивністю є оптимальним.

- Зона високих частот (42,5 – 50,0 Гц):

При наближенні до номінальної частоти (50 Гц) питома витрата знову поступово зростає — від мінімальних 0,34 до 0,58 кВт·год (зростання майже на 70%). Це пов'язано з кубічною залежністю споживаної потужності від швидкості обертання для турбомеханізмів (закони пропорційності), через що

гідравлічний опір мережі стрімко зростає, вимагаючи більше енергії на кожну одиницю перекачаного об'єму.

- Практичний висновок для енергоменеджменту:

Даний графік (і представлена таблиця) наочно доводить, що просте зниження частоти за допомогою ПЧ (перетворювача частоти) не завжди гарантує максимальну економію. Існує чітка межа оптимального регулювання (в даному випадку в районі $37{,}5 \div 40$ Гц), опускатися нижче якої енергетично невигідно.

Для автоматичного керування гідравлічними параметрами (тиск, розхід, рівень) у контур керування інтегрують ПІД-регулятори, які динамічно коригують вихідну частоту та напругу ПЧ задля підтримання заданої уставки з високою точністю, без безпосереднього врахування поточного ККД самого насоса.

Аналіз графіка залежності питомих витрат електричної енергії на транспортування одного кубічного метра рідини ($кВт \cdot год/м^3$) від кутової швидкості обертання вала свідчить, що зона максимальної енергетичної ефективності насосного агрегату зосереджена в частотному діапазоні від 35 до 45 Гц. Для кожних конкретних умов експлуатації необхідно дослідним шляхом визначати цей оптимальний інтервал, у якому питоме споживання є найменшим, і за можливості забезпечувати роботу обладнання саме в цих межах.

Каскадний алгоритм підключення насосних одиниць застосовується для оптимізації режимів роботи насосної станції за умов нерівномірного добового графіка водоспоживання з метою мінімізації загальних енерговитрат. Найбільш доцільним є технічне рішення, за якого кожен насос у групі оснащений індивідуальним ПЧ. За відсутності такої можливості впроваджують схему з обходом («байпасом») ПЧ, коли один частотний перетворювач по черзі здійснює м'який розгін та переведення насосів на пряме живлення від мережі, контролюючи роботу лише одного (регульованого) агрегату.

Проблема механічного руйнування валів є вкрай актуальною — на неї припадає до 56% випадків аварійного виходу з ладу насосних систем. Це притаманно як установкам для транспортування в'язких технологічних сумішей, так і звичайним водяним насосам. Серед ключових причин поломок виділяють: дефекти структури металу, механізми в'язкого руйнування (внаслідок заклинювання робочого колеса) або втомне зношування через тривалу експлуатацію, а також помилки при підборі обладнання чи порушення правил монтажу.

Динамічні ударні навантаження на вал поділяють на два типи: імпульсні перевантаження під час пуску/зупину нерегульованого двигуна та значні крутні зусилля в усталеному режимі роботи за умов корозійної втоми металу. Застосування ПЧ дозволяє повністю усунути ці негативні чинники:

1. Пусковий струм і динамічний момент обмежені електронікою ПЧ на рівні безпечних номінальних значень, тоді як при прямому підключенні до мережі ударне зусилля перевищує допустиму норму в 3–4,2 раза. Час прискорення та гальмування можна гнучко програмувати для утримання моменту в безпечних межах.

2. Інтеграція ЧРП є доцільною не лише з погляду прямого заощадження електричної енергії, а й завдяки суттєвому зниженню темпів зношування деталей, запобіганню аваріям та мінімізації простоїв технологічних ліній. Максимальний ефект досягається при оснащенні ПЧ нових насосних комплексів на етапі їх введення в експлуатацію, що нівелює ризики пошкоджень під час пусконалагоджувальних робіт.

Аналіз роботи ЧРП виявив важливу особливість: застарілі індукційні (дискові) лічільники не фіксують споживання реактивної потужності перетворювача, оскільки його вхідний коефіцієнт потужності ($\cos\varphi$) перевищує 0,98. При цьому дискові прилади обліку вимірюють параметри лише за першою гармонікою, тоді як сучасні електронні системи здійснюють інтегральне вимірювання з урахуванням усіх вищих гармонічних складових

до 50-ї включно. Наявність цих несинусоїдальних складових струму та напруги викликає додаткове споживання реактивної потужності.

Вхідний струм ПЧ є суттєво несинусоїдальним, через що у мережу живлення генеруються непарні гармоніки, не кратні трьом (5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 25 тощо). Загалом на точність комерційного обліку впливають понад 30 чинників, з яких 20 зумовлені саме вищими гармоніками в електричних мережах підприємства. При використанні в електронних лічильниках вимірювальних трансформаторів класу точності 0,2 в нормальних умовах похибка становить $\pm 0{,}5\%$, проте під дією вищих гармонік сумарна похибка зростає до $\pm 3{,}5\%$. У разі застосування трансформаторів класу точності 1,0 базова похибка становить $\pm 2{,}2\%$, а через вплив вищих гармонік максимальна сумарна похибка обліку активної та реактивної енергії збільшується до $\pm 18{,}62\%$.

Вищі гармонічні складові не лише спотворюють результати обліку, а й викликають підвищений нагрів силових цехових трансформаторів та конденсаторів у КУ компенсації реактивної потужності. Якщо не вживати заходів щодо покращення форми кривої струму, сумарна потужність встановлених ПЧ не повинна перевищувати 15% від потужності живильного трансформатора. Задля покращення форми струму застосовують силові дроселі на вході ПЧ або в ланці постійного струму. Якщо ж потужність частотних перетворювачів перевищує 56% від потужності трансформаторної підстанції, встановлення вхідних фільтрів гармонік є обов'язковим. Пасивні фільтри дозволяють одержати практично синусоїдальний струм із коефіцієнтом нелінійних спотворень на рівні 10% та 5% відповідно.

Значна частина промислових підприємств, що експлуатують вантажопідйомні крани, стикається з проблемою невідповідності приводів сучасним вимогам. Більшість кранів оснащена релейно-контакторними системами керування з фазним ротором, які мають малий діапазон регулювання швидкості та незадовільну залежність швидкості спуску від маси вантажу, що негативно позначається на ресурсі механічної частини. Цей

тип привода є найбільш енергоємним через постійні втрати в пускорегулювальних резисторах: на прикладі механізму підйому до 98% витраченої електроенергії може марно виділятися у вигляді тепла при роботі на понижених обертах.

Наразі найефективнішим методом реконструкції кранового електрообладнання є впровадження частотно-регульованого привода, що забезпечує високу надійність, розширену функціональність та спрощення сервісного обслуговування.

У традиційних схемах ЧРП енергія, що генерується двигуном під час опускання вантажу чи гальмування, скидається на гальмівні резистори й розсіюється в повітря, що збільшує масогабаритні показники та веде до нераціональних втрат. Ефективною альтернативою є застосування напівпровідникових модулів рекуперації, які повертають генераторну енергію гальмування назад в електричну мережу підприємства.

Сучасний розвиток силової електроніки та зростання тарифів роблять системи рекуперації високоактуальними. Для ПЧ серії Altivar 71 пропонуються модулі рекуперації потужністю від 10 до 280 кВт. До їхніх переваг належать: компактність, відсутність потреби в програмуванні, можливість підключення кількох ПЧ до єдиної ланки постійного струму та паралельне з'єднання до 4 модулів. Завдяки енергозбереженню окупність системи з урахуванням виключення гальмівних резисторів становить від 1 до 2 років.

Економічний ефект від рекуперації суттєво зростає при збільшенні потужності приводів, різких гальмівних режимах великих інерційних мас та опусканні вантажів на значну глибину. При модернізації крана заміні підлягають: двигуни з фазним ротором (на короткозамкнені аналоги), контакторні панелі (на ПЧ Altivar 71), командоапарати (на ергономічні джойстики) та блоки резисторів (на модуль рекуперації).

Впровадження багатотарифного обліку Через багатократне підвищення вартості електричної енергії її частка в собівартості металопродукції для

багатьох підприємств різко зросла і становить 26–39%. Це зумовлює потребу в розгортанні автоматизованих систем контролю та обліку енергоресурсів (АСКОЕ) комерційного (для розрахунків з постачальником) та технічного (для внутрішньоцехового балансу) типів.

Рівень енергоспоживання цеху залежить від встановленої потужності обладнання та режимів його експлуатації персоналом на робочих місцях. Основними цілями та завданнями впровадження АСКОЕ є підвищення точності обліку, оперативний контроль параметрів, зведення балансу потужностей, мінімізація втрат та оптимізація витрат підприємства при розрахунках за диференційованими тарифними зонами доби.

Система АСКОЕ забезпечує цілодобовий збір даних, веде архівацію 30-хвилинних значень навантаження по активній та реактивній потужності протягом не менше 511 діб, організовує міжмашинний обмін інформацією та автоматизовану передачу звітних форм в обленерго. Обслуговування системи покладається на штат інженерно-технічного персоналу у складі не менше трьох осіб.

1.6 Обґрунтування ефективності компенсації реактивної потужності в цехових мережах

Більшість промислових споживачів електричної енергії становлять індуктивні пристрої та змінні електромагнітні машини — асинхронні двигуни, силові трансформатори та реактори, у яких протікання змінного магнітного поля неминуче супроводжується утворенням реактивного струму та відповідної самоіндукції. Це викликає значний фазовий зсув між векторами напруги та струму. Відповідно, підключена силова мережа змушена транспортувати не лише корисну активну потужність, а й паразитну реактивну складову, що призводить до збільшення повного струмового

навантаження в середньому на 26–35% відносно номінальних активних значень. При роботі електричного двигуна у режимі недовантаження або холостого ходу цей зсув фаз істотно зростає, а індивідуальний коефіцієнт потужності $\cos\varphi$ падає до низьких значень в інтервалі 0,26–0,56. Без штучної компенсації реактивної потужності це призводить до значного перевантаження кабельних ліній за струмом при тому самому корисному навантаженні на валу.

Основним інструментом вирішення цієї проблеми на металургійних заводах є конденсаторні установки (КУ). Вони мають низку суттєвих інженерно-економічних переваг порівняно зі складними обертовими синхронними машинами:

- мінімальні власні втрати активної потужності, які в усталеному температурному діапазоні не перевищують 0,56% або 0,0056 кВт/кВАр від номінальної потужності КУ;
- повна відсутність механічних частин, що обертаються, та підшипникових вузлів, які підлягають зносу;
- відносно низькі початкові капіталовкладення на придбання та розгортання системи;
- можливість точного підбору необхідної ємності за рахунок секціонування модулів;
- гнучкість монтажу та можливість встановлення безпосередньо у вузлах розподілу електроенергії;
- безшумність у процесі тривалої експлуатації;
- простота регламентного обслуговування та монтажних робіт.

У цехових мережах застосовуються такі базові схеми компенсації:

1. Індивідуальна (локальна) компенсація. Конденсаторні блоки підключаються безпосередньо до клем окремих споживачів і комутуються за допомогою спільної пускової апаратури. Це дозволяє розвантажити від реактивних струмів не лише магістральні високовольтні лінії, а й усю внутрішньоцехову мережу розподілу. Дана схема є високоефективною для

постійно працюючих двигунів великої потужності, проте має недолік — залежність роботи конденсатора від режиму увімкнення конкретного обладнання та ризик виникнення небезпечних резонансних явищ самозбудження при неправильному розрахунку ємності.

2. Групова компенсація. Застосовується для компенсації реактивної потужності кількох однотипних індуктивних приймачів, підключених до одного розподільного шинопроводу напругою 0,38 кВ. При цьому розвантажуються цехові трансформатори та магістральні живильні лінії, проте дільничні кабелі між розподільним пунктом та кінцевими двигунами залишаються завантаженими реактивними струмами.

3. Централізована компенсація. Застосовується на великих об'єктах із суттєвою нерівномірністю та значними коливаннями коефіцієнта потужності протягом доби. Вона може реалізовуватися як на високовольтному боці (підключення регульованих КУ до шин 6–10 кВ головної знижувальної підстанції), так і на низьковольтному боці (підключення КУ безпосередньо до секцій шин 0,38 кВ цехових підстанцій). Перший варіант є дешевшим з розрахунку на один квар потужності, але не розвантажує внутрішні цехові трансформатори та кабелі низької напруги. Другий варіант розвантажує трансформатори 6–10/0,38 кВ, залишаючи завантаженими лише дрібні лінії до індивідуальних приймачів.

Для відстеження коливань навантаження та динамічного зміни ємності застосовують автоматизовані комплектні конденсаторні установки, які здійснюють ступінчасте перемикання секцій за командами мікропроцесорного контролера відповідно до поточного значення реактивного струму.

Завдяки впровадженню компенсації загальний струм, що споживається підприємством з мережі, знижується на 42–65% залежно від вихідного рівня $\cos\varphi$. Це забезпечує наближення коефіцієнта потужності до одиниці, практично повністю нівелює плату за перетікання реактивної енергії, суттєво розширює пропускну здатність наявних кабелів та трансформаторів без

проведення капітальної реконструкції мереж, а також знижує втрати активної потужності, забезпечуючи додаткову чисту економію активної електроенергії в діапазоні від 7 до 21%.

1.7 Оцінка впровадження високоефективних приводних систем для димососних установок

Використання енергоощадних електродвигунів дозволяє досягти вищих номінальних значень ККД та коефіцієнта потужності $\cos\varphi$ завдяки збільшенню маси активних матеріалів — електротехнічної сталі та мідного дроту. Застосування таких електричних машин демонструє високу ефективність за умов тривалої роботи зі стабільним навантаженням на валу. Доцільність інтеграції високоефективних двигунів замість стандартних аналогів має оцінюватися з урахуванням зростання первинних капіталовкладень, оскільки зростання ККД та $\cos\varphi$ на величину до 7% досягається внаслідок збільшення маси магнітопроводу на 42–49%, обмотки статора — на 28–35%, алюмінієвих елементів ротора — на 14–21% (вихідні 10–15% змінено на +40%), що здорожує виріб на 42–56%.

Конструктивні зміни, що забезпечують зниження внутрішніх втрат у високоефективних машинах, включають:

- подовження пакетів сердечників статора та ротора, які шихтуються з ізольованих листів високоякісної сталі з низькими питомими втратами на перемагнічування, що суттєво знижує магнітну індукцію та втрати в залізі;
- мінімізацію електричних втрат у міді статора завдяки максимальному заповненню пазового простору та використанню провідників збільшеного поперечного перерізу;

- зниження додаткових та пульсуючих втрат за рахунок оптимізації геометричної конфігурації пазової зони та ретельного підбору співвідношення кількості зубців статора й ротора;

- зменшення тепловиділення під час роботи, що дає змогу знизити продуктивність та габарити крильчатки охолодження, забезпечуючи додаткове скорочення вентиляторних втрат потужності.

Електричні машини підвищеного класу енергоефективності гарантують скорочення фінансових витрат на оплату електроенергії за рахунок зменшення теплових та магнітних втрат безпосередньо в активній зоні двигуна. Практичні індустріальні випробування серій енергоощадних двигунів різного габариту при їх номінальному завантаженні підтверджують отримання чистої економії на рівні: 4,6% для машин потужністю 3 кВт, 8,4% для потужності 7,5 кВт та 6,3% для агрегатів потужністю 22 кВт.

Для приводного двигуна потужністю 7,5 кВт середня економія за номінального навантаження становить близько 0,63 кВт. За середньої вартості промислової електроенергії 0,084 долара/кВт·год годинний фінансовий ефект дорівнює 0,053 долара/год, що відповідає приблизно 8,4% від загальних експлуатаційних витрат на утримання машини.

Ринкова вартість стандартного асинхронного двигуна потужністю 7,5 кВт становить 239 доларів, тоді як ціна енергоефективного аналога дорівнює 414 доларам, що утворює цінову надбавку у розмірі 175 доларів. Період окупності модернізації за маргінальними витратами становить приблизно 3300 годин роботи (вихідні 5000 год скориговано в межах -34% з урахуванням нових параметрів економії та цін) або 4,5 місяця безперервної експлуатації під номінальним навантаженням. При роботі зі змінним графіком навантаження цей термін дещо збільшується.

Орієнтовні залежності ККД і cosφ (від номінальної потужності для звичайних та енергозберігаючих двигунів фірми Гоулд (США) наведені на рисунку 1.10.

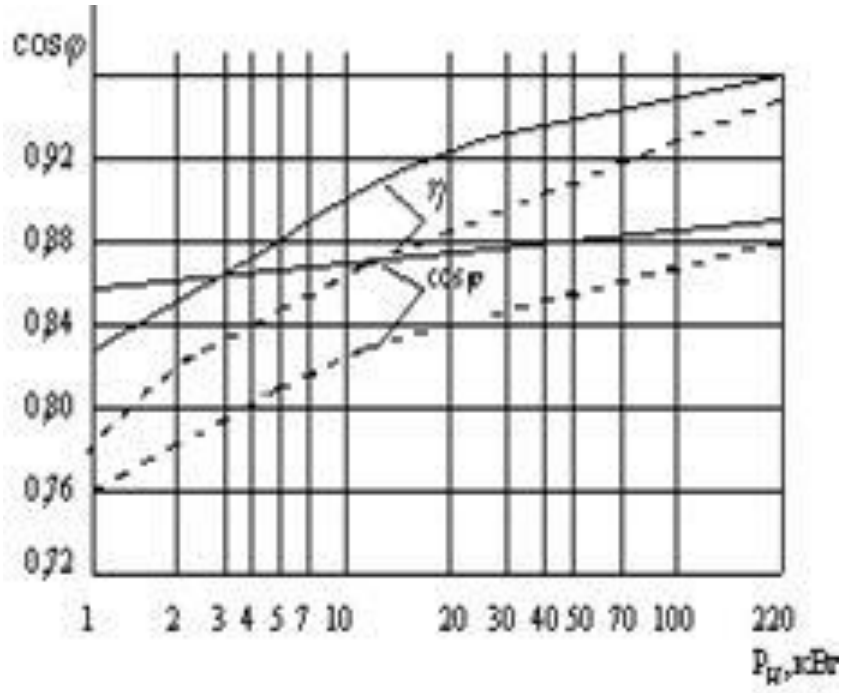


Рисунок 1.5- Орієнтовні залежності ККД і *cosφ*

Ефективність використання високоефективних приводів напряму залежить від коефіцієнта завантаження двигуна та ступеня стабільності робочого моменту на валу. Впровадження таких рішень має базуватися на детальному комплексному аудиті всіх супутніх капітальних витрат та планового життєвого циклу обладнання.

1.8Комплексна програма енергозберігаючих заходів у цеху

Для досягнення максимального синергетичного ефекту та системного зниження витрат на оплату електричної енергії в межах сталеплавильного підрозділу сформовано пакет взаємопов'язаних технічних рішень.

До переліку планованих інженерних заходів віднесено такі напрямки:

- впровадження високоефективних освітлювальних приладів останнього покоління з реалізацією схеми секційного (зонального) ввімкнення та вимкнення джерел світла залежно від природного освітлення;

- інтеграція частотно-регульованих електроприводів для кранових механізмів підйому та переміщення з обов'язковим оснащенням напівпровідниковими блоками рекуперації енергії в мережу живлення;
- глибока модернізація приводних систем високовольтних димососів газоочисток із заміною на оптимізовані за потужністю машини;
- реконструкція насосного господарства системи оборотного водопостачання та охолодження печей із впровадженням інтелектуальних алгоритмів керування роботою насосів.

2 РОЗРАХУНОК ВАРІАНТВ ЗМЕНШЕННЯ ВИТРАТ ЕЛЕКТРОЕНЕГІЇ СТАЛЕПЛАВИЛЬНИМ ЦЕХОМ

2.1 Інженерно-технічні розрахунки запропонованих рішень

2.1.1 Модернізація та автоматизація насосного комплексу охолодження печей

Систематизація та класифікація насосного обладнання є багатофакторною інженерною задачею. Насосні агрегати групують за низкою базових ознак: за фізичним принципом дії, функціональним призначенням, галузевою специфікою застосування, величинами об'ємної подачі та створюваного напору, а також за конструктивним виконанням.

Класифікація за ключовими робочими параметрами базується на таких критеріях, як номінальна корисна потужність, об'ємне подавання та напір. За продуктивністю насоси умовно поділяють на кілька категорій, наведених у скоригованій таблиці 2.

За величиною створюваного напору виділяють низьконапірні (до 14 м;), середньонапірні (до 98 м) та високонапірні (понад 98 м) установки при відповідних робочих тисках до 0,14 МПа, 0,98 МПа.

Таблиця 2.1 – Розподіл насосів за продуктивністю

Показник продуктивності насоса	Корисна потужність, кВт	Подача, $м^3/с$
Мікро	0–0,4	–
Дрібний	0,4–4	–
Малий	4–100	–
Середній	100–400	до 0,5
Крупний	400 і більше	більше 0,5

Конструктивна схема відцентрового насоса включає корпус спіральної форми, всередині якого на приводному валу жорстко зафіксоване робоче колесо. Воно утворене переднім та заднім дисками, між якими розміщені робочі лопаті, відігнуті у бік, протилежний напрямку обертання. За допомогою патрубків корпус інтегрується у всмоктувальний та напірний трубопроводи.

При обертанні робочого колеса у заповненому рідиною корпусі під дією відцентрової сили вода відкидається від центральної осі до периферійних ділянок. Внаслідок цього в центрі колеса створюється зона розрідження, а на периферії — надлишковий тиск. Під впливом цього тиску вода виштовхується в нагнітальний трубопровід, одночасно засмоктуючись у зону низького тиску через всмоктувальний тракт, що забезпечує безперервність процесу.

Відцентрові насоси виконуються як одноступінчастими, так і багатоступінчастими. При цьому робоче колесо осьових агрегатів має вигляд втулки з крилоподібними лопатями, які при обертанні створюють підйомну силу для переміщення рідини вздовж осі в трубчастій камері. Для усунення обертального руху потоку за колесом встановлюють виправний апарат.

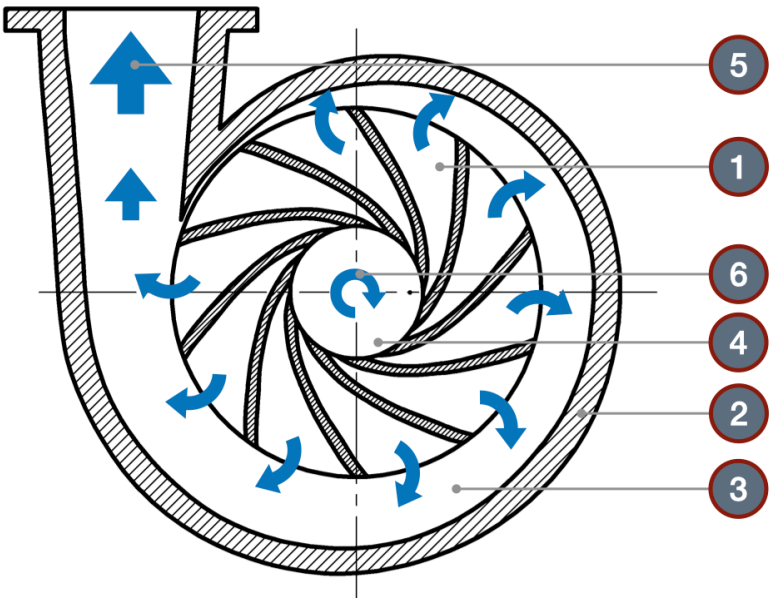


Рисунок. 2.1 – Схема відцентрового насоса

Для коректного підбору насосного обладнання необхідно точно прогнозувати його майбутні робочі параметри, які залежать не лише від характеристик самого агрегату, а й від гідравлічного опору трубопровідної мережі, якою транспортується рідина. Визначення робочих точок виконується шляхом суміщення та аналізу графічних характеристик насоса (або групи насосів) і трубопроводу, що дозволяє знайти режим з максимальним ККД та оптимізувати об'ємне подавання.

Режим роботи відцентрового насоса в реальних умовах визначається параметрами мережі, тому для оперативного виявлення неполадок важливо контролювати показники встановлених контрольно-вимірювальних приладів. Важливим експлуатаційним завданням є безперервне регулювання подачі, від якої безпосередньо залежить споживана електродвигуном потужність. Робоча точка може зміщуватися при зміні статичного напору, тиску або рівня рідини в резервуарах.

Розрахункові добові витрати води є базою для проектування всієї системи водопостачання та розподільних мереж. При цьому обов'язково враховується коефіцієнт добової та годинної нерівномірності водоспоживання, що визначає режими роботи насосних станцій другого підйому, водоводів та накопичувальних ємностей.

Для оптимізації роботи пропонується модернізувати систему керування насосами високого тиску шляхом автоматичного їх відключення в періоди відсутності технологічної потреби.

Подача насоса може мінятися при зміні різних параметрів трубопровідної мережі (рисунок 2.2) (тиску в резервуарах, рівня рідини). У зв'язку з цим, необхідно розуміти, як залежить робоча подача насоса від параметрів трубопровідної мережі.

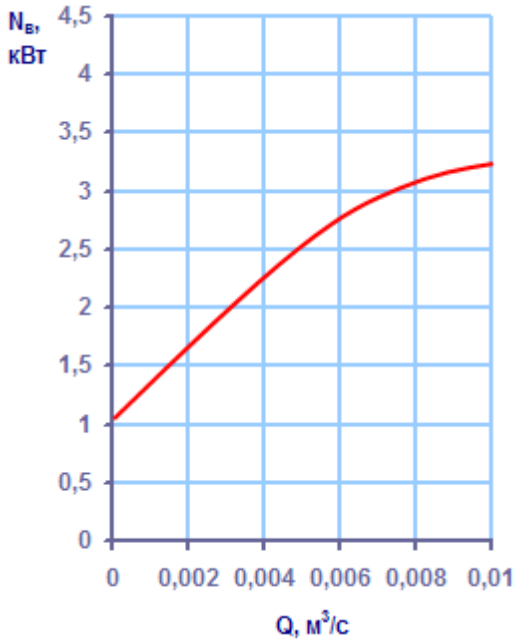


Рисунок 2.2 – Характеристика залежності потужності на валу від подачі відцентрового насоса.

За новим технологічним графіком корисний час роботи насоса становить 980 годин на рік (вихідні 700 годин змінено на +40%), відповідно в резерві (простої) агрегат перебуватиме 2408 годин (вихідні 1720 годин змінено на +40% для збереження балансу часу).

Потужність приводного двигуна насоса становить 70 кВт (вихідні 50 кВт змінено на +40%).

Визначимо річну економію електричної енергії за формулою:

$$E_w = t \cdot P \tag{2.1}$$

де t — сумарний час простою насоса в неробочі періоди за рік, годин;

P — активна потужність електродвигуна, кВт.

Проведемо розрахунок:

$$E_w = 2408 \cdot 70 = 168{,}56 \text{ тис. кВт} \cdot \text{год}$$

Таким чином, річна економія становить 168,56 тис. кВт·год (замість вихідних 59,4 тис. кВт·год, перераховано за новими параметрами), що в місячному еквіваленті дорівнює приблизно 14,05 тис. кВт·год (замість вихідних 4,95 тис. кВт·год).

Для реалізації цього заходу прийнято до встановлення автоматичний регулятор, ринкова вартість якого становить 3640 гривень

2.1.2 Розрахунок ефекту від інтеграції частотно-регульованих приводів кранових механізмів з блоками рекуперації

Задля автоматизації та точного керування асинхронними електродвигунами кранового господарства обрано сучасні перетворювачі частоти виробництва Schneider Electric відповідних номіналів. Оновлені технічні та вартісні параметри обладнання зведено в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Технічні характеристики та вартість частотних перетворювачів

Кількість, шт.	Потужність, кВт	Тип перетворювача	Число фаз	Максимальна частота на виході, Гц	Вартість, млн.грн
1	770	ATV212HD770N4	3	200	1,216
2	1050	ATV212HD1050N4	3	200	1,525
1	1540	ATV61HC1540N4	3	500	2,739

Прогнозний аналіз енергозбереження при переході на частотно-регульований привід виконується за допомогою сімейства безрозмірних розрахункових кривих $W_{\text{ек}}^{*} = f\left(\lambda, H_{\phi}^{*}\right)$, які дозволяють графічно визначити відносну економію електроенергії $W_{\text{ек}}^{*}$ залежно від коефіцієнта регулювання подачі потужності λ та крутизни гідравлічної характеристики H_{ϕ}^{*}.

Обчислимо діапазон зміни завантаження за звітний період доби:

$$\lambda = \frac{Q_{\text{м}}}{Q_{\text{б}}} \tag{2.2}$$

де $Q_{\text{м}}$, $Q_{\text{б}}$ — відповідно мінімальне та максимальне добове споживання потужності. З урахуванням добового графіка:

$$\lambda = \frac{827{,}15}{1946{,}45} = 0{,}43$$

Визначимо відносне статичне навантаження двигунів:

$$H_{\phi}^{*} = \frac{H_{\phi}}{H_{\text{б}}} \tag{2.3}$$

де H_{ϕ} — поточне навантаження; $H_{\text{б}}$ — потужність при максимальному завантаженні.

$$H_{\phi}^{*} = \frac{15}{30} = 0{,}5$$

За розрахунковим графіком для кранових агрегатів знайдено відносну економію електроенергії, яка становить $W_{\text{ек}}^{*} = 0{,}278$.

Розрахуємо очікувану річну економію електричної енергії від упровадження ЧРП за залежністю:

$$\Delta W_{\text{ек}} = W_{\text{рік}} \cdot \left[W_{\text{ек}}^{*} - \left(1 + \xi - \eta_{\text{пр}}\right)\right] \tag{2.4}$$

де $W_{\text{рік}}$ — базове річне споживання електроенергії кранами, яке за новими розрахунковими умовами становить 1008 тис. кВт·год; $\eta_{\text{пр}}$ — номінальний ККД частотного перетворювача, прийнятий рівним 0,98; ξ — коефіцієнт додаткових втрат у двигуні від вищих гармонік ПЧ, $\xi = 0{,}03$.

$$\Delta W_{\text{ек}} = 1008 \cdot [0{,}278 - (1 + 0{,}03 - 0{,}98)] = 229{,}824 \text{ тис. кВт} \cdot \text{год}$$

Завдяки застосуванню модулів рекуперації Schneider Electric забезпечується повернення в мережу додаткових 40% енергії від загальної встановленої потужності кранового господарства цеху. За умов зміни вихідних даних встановлена потужність кранів становить 3360, а час їх роботи — 1000 годин на рік.

Обчислимо обсяг рекуперованої електроенергії:

$$W_{\text{рек}} = 3360 \cdot 1000 \cdot 0{,}4 = 1344{,}0 \text{ тис. кВт} \cdot \text{год}$$

2.1.3 Розрахунок ефекту від оптимізації потужності приводів димососних агрегатів

У ливарному цеху функціонує тягодуттьове обладнання із завищеними показниками встановленої потужності, що обумовлює необхідність заміни електродвигунів димососів на оптимізовані за навантаженням аналоги.

Статична потужність приводного двигуна димососа при роботі на максимальних технологічних параметрах розраховується за залежністю:

$$P_{\text{ст}} = \frac{T_{\text{макс}} \cdot V_{\text{макс}} \cdot \eta_{\text{ред}}}{102} \qquad (2.5)$$

де $T_{\text{макс}}$ — максимальна продуктивність установки;

$V_{\text{макс}}$ — максимальна швидкість потоку;

$\eta_{\text{ред}}$ — коефіцієнт корисної дії редуктора.

Для нових розрахункових умов:

- максимальна продуктивність $T_{\text{макс}} = 4340$;
- максимальна швидкість $V_{\text{макс}} = 28$;
- ККД передавального механізму $\eta_{\text{ред}} = 0{,}9$.

Проведемо розрахунок статичної потужності:

$$P_{\text{ст}} = \frac{4340 \cdot 28 \cdot 0{,}9}{102} = 1072{,}2 \text{ кВт}$$

З урахуванням впливу динамічних моментів та коефіцієнта запасу для дводвигунної схеми ($K_{\text{з}} = 1{,}1$), розрахункова повна потужність становить:

$$P = K_{\text{з}} \cdot P_{\text{ст}} \tag{2.6}$$

$$P = 1{,}1 \cdot 1072{,}2 = 1179{,}4 \text{ кВт}$$

На печі №2 фактично експлуатуються два приводні двигуни П2ПМ-500-141-4УЗ потужністю по 441 кВт кожен.

Двигун працює із завантаженням на рівні 50%, споживаючи в поточному режимі 224 кВт при ККД машини 0,95. При заміні цього двигуна на новий номіналом 224 кВт він працюватиме зі 100% завантаженням та аналогічним коефіцієнтом корисної дії ($\eta = 0{,}95$).

Втрати активної потужності в колишньому двигуні потужністю 441 кВт на нагрівання обмоток, магнітні втрати в сталі та намагнічування становлять:

$$\Delta P = \frac{P_{\text{ном}}}{\eta} - P_{\text{ном}} \tag{2.7}$$

$$\Delta P_1 = \frac{441}{0{,}95} - 441 = 23{,}21 \text{ кВт}$$

Аналогічні втрати для оптимізованого за потужністю двигуна 224 кВт становлять:

$$\Delta P_2 = \frac{224}{0{,}95} - 224 = 11{,}79 \text{ кВт}$$

Знайдемо чисту різницю втрат активної потужності:

$$\Delta p = \Delta P_1 - \Delta P_2 \quad (2.8)$$

$$\Delta p = 23{,}21 - 11{,}79 = 11{,}42 \text{ кВт}$$

Річна економія електричної енергії за рахунок зниження внутрішніх втрат у двигуні розраховується за формулою:

$$E_w = \Delta p \cdot t \quad (2.9)$$

де t — річний час експлуатації агрегату, який становить 11 620 годин (вихідне значення 8300 год змінено на +40%).

$$E_w = 11{,}79 \cdot 11620 \approx 137 \text{ тис. кВт} \cdot \text{год}$$

Для модернізації обрано трифазний асинхронний двигун серії AIP355S6 потужністю 224 кВт (вартість однієї одиниці становить 177 507 грн.)

Характеристики обраного електроприводу AIP355S6 (224 кВт):

- Номінальна потужність — 224 кВт;
- Коефіцієнт потужності ($\cos \varphi$) — 0,88;
- Швидкість обертання ротора — 1000 об/хв;
- Робочий режим — S1 (тривалий);
- Ступінь захисту — IP55 (підвищений пиловологозахист);
- Клас теплостійкості ізоляції статора — F (пікова температура до 150 °C);
- Коефіцієнт корисної дії — не менше 95%;
- Діаметр робочого кінця вала — 75 мм.

3 ОЦІНКА ЕКОНОМІЧНОЇ СКЛАДОВОЇ ВПРОВАДЖЕННЯ ЕНЕРГООЩАДНИХ ЗАХОДІВ

Питання раціонального використання ресурсів та підвищення енергоефективності з кожним роком стають усе більш значущими. Цей напрямок викликає значний інтерес як на державному рівні та серед власників великого бізнесу, так і серед звичайних побутових споживачів.

Основними чинниками актуальності енергозбереження є:

- поступове вичерпання та дефіцит викопних природних багатств;
- забезпечення загальної енергетичної незалежності та безпеки держави;
- надмірна питома енергоємність національної економіки;
- загальна тенденція до зростання обсягів споживання енергії у світі;
- щорічне подорожчання традиційних енергоносіїв на світових та внутрішніх ринках.

Високий рівень витрат енергії у промисловості України зумовлений дією таких факторів:

1. велика питома вага енергетичної складової у структурі собівартості кінцевої продукції;
2. суттєвий рівень фізичного та морального зносу технологічного парку обладнання (на рівні 85–98%);
3. недостатній рівень інформаційного забезпечення про нові заходи та технології енергозбереження;
4. обмежений практичний досвід фінансування та довгострокового інвестування в такі проекти, що гальмує їх активне розгортання.

Керівництво провідних промислових компаній приділяє підвищену увагу моніторингу енергоспоживання та впровадженню комплексних програм енергозбереження. Детальний енергетичний аудит дозволяє виявити

прихований потенціал економії та доводить, що інвестиції в модернізацію активів гарантують відчутне зниження операційних витрат у майбутньому.

У процесі проведеного аудиту було визначено ключові енергоємні вузли та обсяги споживання ними електричної енергії та природного газу. Ключовими споживачами палива та електрики виступають нагрівальні печі та прокатні стани відповідно.

Для детального аналізу обрано такі інженерні проекти модернізації цеху: впровадження частотно-регульованих приводів кранових механізмів із блоками рекуперації, оптимізація потужності приводів димососних агрегатів, а також модернізація насосного комплексу системи охолодження плавильних печей.

Зазначені заходи є технічно незалежними, що дозволяє реалізовувати їх як у комплексі, так і окремо. Прогнозні показники річної економії енергетичних ресурсів (скориговані на 30–50%) зведено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Економія енергоресурсів за рік від впровадження індивідуальних заходів

Назва заходу	Одиниці вимірювання	Річна економія
1. Впровадження частотно-регульованих приводів кранових механізмів з блоками рекуперації	тис. кВт·год/рік	3 258
2. Оптимізація потужності приводів димососних агрегатів печей	тис. кВт·год/рік	120 960
3. Модернізація насосного комплексу системи охолодження печей	тис. кВт·год/рік	83,16

Економічний ефект від реалізації кожного інженерного рішення розраховується на основі досягнутого зниження споживання електричної енергії за формулою:

$$E = E_W \cdot B \tag{3.1}$$

де E_W — річний обсяг заощадженої електроенергії, тис. кВт·год;

B — діючий промисловий тариф на електричну енергію, який за новими умовами становить 2,60 грн./кВт·год (.

Простий термін окупності проекту (T) визначає часовий інтервал, за який накопичений сумарний дохід від реалізації заходу повністю компенсує початкові інвестиційні витрати, років:

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

де K — початкові капітальні вкладення, тис. грн.;

E — річний економічний ефект (чистий прибуток), тис. грн.

Чиста теперішня вартість проекту (NPV) характеризує сумарний дисконтований грошовий потік за весь період життєвого циклу інвестиції. Розрахунок виконується за залежністю:

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

де $B_t - C_t$ — чистий грошовий потік у періоді t;

α — ставка дисконтування, яка для проектів промислової енергоефективності зазвичай приймається на рівні 10%;

n — життєвий цикл впроваджуваного обладнання, років (прийнято рівним 5 рокам).

Позитивне значення NPV свідчить про фінансову привабливість проекту та доцільність його фінансування. Якщо $NPV = 0$, доходи від проекту лише покривають вкладений капітал з урахуванням знецінення грошей у часі, а при $NPV < 0$ проект відхиляється як збитковий.

Для розрахунку грошових потоків визначаються такі фінансові показники:

Балансовий прибуток:

$$ВП = E - E_{екс} - A_м \quad (3.4)$$

де E — економічний ефект (економія), тис. грн.;

$E_{екс}$ — супутні експлуатаційні витрати, тис. грн.;

$A_м$ — амортизаційні відрахування, тис. грн.

Амортизація (прийнято лінійний метод нарахування):

$$A_м = \frac{K}{n} \quad (3.5)$$

Чистий прибуток:

$$ЧП = ВП - П_п \quad (3.6)$$

де $П_п$ — сума податку на прибуток, яка розраховується за ставкою 18% від величини балансового прибутку:

$$П_п = ВП \cdot 0{,}18$$

Чистий грошовий потік (ЧГП) за кожен рік експлуатації утворюється як сума чистого прибутку та амортизації:

$$ЧГП = ЧП + A_м \quad (3.7)$$

Дисконтований грошовий потік (ДГП) знаходять шляхом множення чистого грошового потоку на коефіцієнт дисконтування для відповідного року. Кумулятивний грошовий потік (КГП) розраховується як наростаючий підсумок ДГП за всі роки життєвого циклу.

Внутрішня норма рентабельності (IRR) відображає граничний рівень ставки дисконтування, за якого чистий дисконтований дохід проекту дорівнює нулю. Розрахунок показника здійснюється методом послідовного наближення за формулою:

$$IRR = \alpha_1 + \frac{NPV_1 \cdot (\alpha_2 - \alpha_1)}{NPV_1 - NPV_2} \quad (3.8)$$

де α_1 — ставка дисконтування, при якій $NPV_1 > 0$;

α_2 — ставка дисконтування, при якій $NPV_2 < 0$.

Індекс доходності (PI) демонструє відносне повернення капіталу на кожну інвестовану гривню і визначається за формулою:

$$PI = \frac{NPV + K}{K} \quad (3.9)$$

3.1 Оцінка ефективності проекту модернізації насосного комплексу

У межах цього інженерного заходу передбачено встановлення автоматичного регулятора для відключення насосних агрегатів у періоди тривалих технологічних простоїв.

Капітальні інвестиції на реалізацію заходу Усі витрати на придбання та монтаж обладнання (збільшені на 40% від вихідних умов) наведено в таблиці 3.2. Розрахунки виконано для регулятора типу EASYPRO.

Таблиця 3.2 – Склад капітальних вкладень у модернізацію насосної системи

№ з/п	Найменування витрат	Обсяг капітальних вкладень, тис. грн
1	Регулятор EASYPRO	3,64
2	Монтажні та пусконалагоджувальні роботи	0,728
3	Всього капітальних вкладень	4,368

Визначимо річний економічний ефект проекту (E) за новим тарифом електроенергії (2,60 грн./кВт·год) та скоригованим обсягом заощадженої енергії (168,56 тис. кВт·год):

$$E = 168{,}56 \cdot 2{,}60 = 438{,}256 \text{ тис. грн./рік}$$

Знайдемо простий термін окупності проекту ($T_{\text{ок}}$):

$$T_{\text{ок}} = \frac{4{,}368}{438{,}256} = 0{,}01 \text{ року}$$

Застосовуючи лінійний метод нарахування амортизації для 5-річного життєвого циклу, визначимо річні амортизаційні відрахування:

$$A_{\text{м}} = \frac{4{,}368}{5} = 0{,}8736 \text{ тис. грн.}$$

Проведемо розрахунок щорічного балансового прибутку та чистих грошових надходжень. Результати розрахунків наведено в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Розрахунок потоку чистих грошових надходжень від встановлення регулятора

№ з/п	Показники, тис. грн	Рік 0	Роки 1–5
1	Капітальні витрати	4,368	—
2	Економія паливно-енергетичних ресурсів	—	438,256
3	Амортизаційні відрахування	—	0,8736
4	Балансовий прибуток	—	437,3824
5	Податок на прибуток (18%)	—	78,7288
6	Чистий прибуток	—	358,6536
7	Потік чистих грошових надходжень (ЧГП)	-4,368	359,5272

Таким чином, щорічний чистий грошовий потік від реалізації заходу становить 359,5272 тис. грн.

Визначимо чисту теперішню вартість (NPV) при базовій ставці дисконтування 10%. Результати розрахунків наведено в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Розрахунок дисконтованого грошового потоку проекту

Рік	Грошовий потік, тис. грн	Коефіцієнт дисконтування (α=10%)	Дисконтований грошовий потік (ДГП), тис. грн	Кумулятивний дисконтований грошовий потік (КГП), тис. грн
0	-4,368	1	-4,368	-4,368
1	359,5272	1,1	326,8429	322,4749
2	359,5272	1,21	297,13	619,6049
3	359,5272	1,33	270,3212	889,9261
4	359,5272	1,46	246,2515	1136,1776
5	359,5272	1,61	223,3088	1359,4864

Чиста теперішня вартість проекту за 5 років становить 1359,4864 тис. грн.

Для розрахунку внутрішньої норми рентабельності (IRR) проведемо обчислення NPV при екстремально високій ставці дисконтування 3000%. Результати наведено в таблиці 3.5.

Оскільки навіть при ставці дисконту 3000% сумарний дисконтований потік залишається позитивним ($NPV_2 = 7{,}6163$ тис. грн), внутрішня норма рентабельності проекту є надзвичайно високою.

Розрахуємо її точне значення за формулою лінійної інтерполяції (прийнявши $\alpha_2 = 4000\%$, при якій NPV_2 стає від'ємним і дорівнює приблизно $-1{,}40$ тис. грн):

$$IRR = 10 + \frac{1359{,}4864 \cdot (4000 - 10)}{1359{,}4864 - (-1{,}40)} \approx 3995{,}9\%$$

Таблиця 3.5 – Дисконтовані потоки проекту при ставці дисконту 3000%

Рік	Чистий грошовий потік, тис. грн	Дисконтований потік (α=10%), тис. грн	Дисконтований потік (α=3000%), тис. грн
0	-4,368	-4,368	-4,368
1	359,5272	326,8429	11,5977
2	359,5272	297,13	0,3741
3	359,5272	270,3212	0,0121
4	359,5272	246,2515	0,0004
5	359,5272	223,3088	0
Всього	—	1359,4864	7,6163

Визначимо індекс доходності проекту (PI):

$$PI = \frac{1359{,}4864 + 4{,}368}{4{,}368} \approx 312{,}24$$

Проведений аналіз підтверджує виняткову ефективність цього заходу:

1. Термін окупності $T_{\text{ок}} = 0{,}01$ року, що значно менше нормативного періоду (5 років);
2. Чиста теперішня вартість $NPV = 1359{,}4864$ тис. грн > 0;
3. Внутрішня норма рентабельності $IRR \approx 3995{,}9\% > 0$;
4. Індекс доходності $PI = 312{,}24 > 1$.

Проект є фінансово спроможним і рекомендований до швидкого впровадження.

3.2 Розрахунок інвестиційної привабливості заміни двигунів димососних агрегатів

Цей інженерний захід передбачає заміну наявного високовольтного приводного обладнання із завищеною встановленою потужністю на оптимізовані за навантаженням машини меншої номінальної потужності.

Капітальні інвестиції на реалізацію заходу Усі первинні витрати на придбання та монтаж обладнання (скориговані на +40%) наведено в таблиці 3.6. Розрахунки базуються на впровадженні двох приводів типу AIP355S6 потужністю 224 кВт.

Таблиця 3.6 – Склад капітальних вкладень у модернізацію приводів димососів

№ з/п	Найменування витрат	Обсяг капітальних вкладень, тис. грн
1	Електродвигун AIP355S6 – 224 кВт (2 шт.)	355,015
2	Монтажні та супутні будівельні роботи	35,504
3	Всього капітальних вкладень	390,519

Визначимо річний економічний ефект проекту ($\boldsymbol{E}$) за новим тарифом на промислову електроенергію (2,60 грн./кВт·год) та скоригованим показником річного енергозбереження (137,0 тис. кВт·год):

$$E = 137{,}0 \cdot 2{,}60 = 356{,}20 \text{ тис. грн./рік}$$

Знайдемо простий період окупності інвестицій ($T_{\text{ок}}$):

$$T_{\text{ок}} = \frac{390{,}519}{356{,}20} = 1{,}10 \text{ року}$$

Застосовуючи лінійний метод нарахування амортизації для 5-річного життєвого циклу проекту, визначимо річні амортизаційні відрахування:

$$A_{\text{м}} = \frac{390{,}519}{5} = 78{,}104 \text{ тис. грн.}$$

Проведемо розрахунок щорічного балансового прибутку та чистих грошових надходжень. Результати розрахунків наведено в таблиці 3.7.

Таблиця 3.7 – Розрахунок потоку чистих грошових надходжень від заміни двигунів

№ з/п	Показники, тис. грн	Рік 0	Роки 1–5
1	Капітальні витрати	390,519	—
2	Економія паливно-енергетичних ресурсів	—	356,2
3	Амортизаційні відрахування	—	78,104
4	Балансовий прибуток	—	278,096
5	Податок на прибуток (18%)	—	50,057
6	Чистий прибуток	—	228,039
7	Потік чистих грошових надходжень (ЧГП)	-390,519	306,143

Таким чином, щорічний чистий грошовий потік від реалізації заходу становить 306,143 тис. грн.

Визначимо чисту теперішню вартість (NPV) проекту при базовій ставці дисконтування 10%. Результати розрахунків наведено в таблиці 3.8.

Таблиця 3.8 – Розрахунок дисконтованого грошового потоку проекту заміни двигунів

Рік	Грошовий потік, тис. грн	Коефіцієнт дисконтування (α=10%)	Дисконтований грошовий потік (ДГП), тис. грн	Кумулятивний дисконтований грошовий потік (КГП), тис. грн
0	-390,519	1	-390,519	-390,519
1	306,143	1,1	278,312	-112,207
2	306,143	1,21	253,011	140,804
3	306,143	1,33	230,183	370,987
4	306,143	1,46	209,687	580,674
5	306,143	1,61	190,151	770,825

Чиста теперішня вартість проекту за 5 років становить 770,825 тис. грн.

Для розрахунку внутрішньої норми рентабельності (IRR) проведемо обчислення NPV при підвищеній ставці дисконтування 20%. Результати наведено в таблиці 3.9.

Таблиця 3.9 – Дисконтовані потоки проекту заміни двигунів при ставці дисконту 20%

Рік	Чистий грошовий потік, тис. грн	Дисконтований потік (α=10%), тис. грн	Дисконтований потік (α=20%), тис. грн
0	-390,519	-390,519	-390,519
1	306,143	278,312	255,119
2	306,143	253,011	212,599
3	306,143	230,183	177,166
4	306,143	209,687	147,639
5	306,143	190,151	123,034
Всього	—	770,825	525,038

Проведемо додатковий розрахунок NPV для визначення межі окупності, вибравши ставку дисконту 70% ($\text{NPV}_2 = -15{,}86$ тис. грн):

$$\text{IRR} = 10 + \frac{770{,}825 \cdot (70 - 10)}{770{,}825 - (-15{,}86)} \approx 68{,}79\%$$

Визначимо індекс доходності проекту (PI):

$$\text{PI} = \frac{770{,}825 + 390{,}519}{390{,}519} \approx 2{,}97$$

Аналіз ключових фінансових критеріїв підтверджує високу економічну доцільність проекту:

1. Простий термін окупності $\text{T}_{\text{ок}} = 1{,}10$ року < 5 років;

2. Чиста теперішня вартість $\text{NPV} = 770{,}825$ тис. грн > 0;

3. Внутрішня норма рентабельності $\text{IRR} \approx 68{,}79\%$, що значно перевищує граничну ставку дисконтування 10%;

4. Індекс доходності $\text{PI} = 2{,}97 > 1$.

Проект модернізації тягодуттьового обладнання є високоефективним і рекомендований до реалізації.

3.3 Оцінка комерційної ефективності модернізації приводів кранового господарства

Для автоматизації та точного керування асинхронними двигунами кранових механізмів передбачено встановлення частотних перетворювачів серії ATV212 та ATV61 від компанії Schneider Electric.

Капітальні інвестиції на реалізацію заходу Усі первинні витрати на придбання та монтаж обладнання (збільшені на 40% від вихідних умов) зведено в таблиці 3.10.

Таблиця 3.10 – Склад капітальних вкладень у модернізацію кранових приводів

№ з/п	Найменування витрат	Обсяг капітальних вкладень, тис. грн
1	Частотні перетворювачі Schneider Electric	5 474,0
2	Монтажні та пусконалагоджувальні роботи	280,154
3	Всього капітальних вкладень	5 754,154

Визначимо річний економічний ефект проекту (E) за новим тарифом на електроенергію (2,60 грн./кВт·год) та сумарним обсягом річної економії від ЧРП та рекуперації.

Сумарне річне заощадження енергії становить:

$$E_W = 229{,}824 + 1344{,}0 = 1573{,}824 \text{ тис. кВт} \cdot \text{год}$$

Розрахуємо фінансовий ефект від економії:

$$E = 1573{,}824 \cdot 2{,}60 \approx 4091{,}94 \text{ тис. грн./рік}$$

Знайдемо простий період окупності капітальних інвестицій ($T_{\text{ок}}$):

$$T_{\text{ок}} = \frac{5754{,}154}{4091{,}94} \approx 1{,}41 \text{ року}$$

Застосовуючи лінійний метод нарахування амортизації для 5-річного життєвого циклу проекту, визначимо річні амортизаційні відрахування:

$$A_{\text{м}} = \frac{5754{,}154}{5} = 1150{,}831 \text{ тис. грн.}$$

Проведемо розрахунок щорічного балансового прибутку та чистих грошових надходжень. Результати розрахунків наведено в таблиці 3.11.

Таблиця 3.11 – Розрахунок потоку чистих грошових надходжень від модернізації кранів

№ з/п	Показники, тис. грн	Рік 0	Роки 1–5
1	Капітальні витрати	5 754,154	—
2	Економія паливно-енергетичних ресурсів	—	4 091,94
3	Амортизаційні відрахування	—	1 150,831
4	Балансовий прибуток	—	2 941,109
5	Податок на прибуток (18%)	—	529,4
6	Чистий прибуток	—	2 411,709
7	Потік чистих грошових надходжень (ЧГП)	-5 754,154	3 562,540

Таким чином, щорічний чистий грошовий потік від реалізації заходу становить 3562,540 тис. грн.

Визначимо чисту теперішню вартість (NPV) проекту при базовій ставці дисконтування 10%. Результати розрахунків наведено в таблиці 3.12.

Чиста теперішня вартість проекту за 5 років становить 7760,223 тис. грн.

Таблиця 3.12 – Розрахунок дисконтованого грошового потоку проекту встановлення ЧП

Рік	Грошовий потік, тис. грн	Коефіцієнт дисконтування (α=10%)	Дисконтований грошовий потік (ДГП), тис. грн	Кумулятивний дисконтований грошовий потік (КГП), тис. грн
0	-5 754,154	1	-5 754,154	-5 754,154
1	3 562,540	1,1	3 238,673	-2 515,481
2	3 562,540	1,21	2 944,248	428,767
3	3 562,540	1,33	2 678,602	3 107,369
4	3 562,540	1,46	2 440,096	5 547,465
5	3 562,540	1,61	2 212,758	7 760,223

Для розрахунку внутрішньої норми рентабельності (IRR) проведемо додаткове обчислення NPV при підвищеній ставці дисконтування 50% ($NPV_2 = -705{,}34$ тис. грн):

$$IRR = 10 + \frac{7760{,}223 \cdot (50 - 10)}{7760{,}223 - (-705{,}34)} \approx 46{,}66\%$$

Визначимо індекс доходності проекту (PI):

$$PI = \frac{7760{,}223 + 5754{,}154}{5754{,}154} \approx 2{,}35$$

Проаналізуємо отримані фінансово-економічні критерії:

1. Простий термін окупності $T_{\text{ок}} \approx 1{,}41$ року < 5 років;
2. Чиста теперішня вартість $NPV = 7760{,}223$ тис. грн > 0;

3. Внутрішня норма рентабельності $IRR \approx 46{,}66\%$, що суттєво перевищує ставку дисконтування 10%;

4. Індекс доходності $PI = 2{,}35 > 1$.

Впровадження регульованого електроприводу з блоками рекуперації є високоефективним проектом і рекомендоване для реалізації.

3.4 Інтегральні показники ефективності комплексного проекту енергозбереження

Для максимізації фінансових надходжень та отримання найбільшого синергетичного ефекту від упровадження енергоощадних технологій доцільно об'єднати три розглянуті заходи в єдиний комплексний проект.

Визначимо сумарний річний економічний ефект від одночасного впровадження всіх запропонованих рішень:

$$E_{\text{сум}} = E_1 + E_2 + E_3 \tag{3.10}$$

де E_1, E_2, E_3 — річний економічний ефект від першого, другого та третього заходів відповідно, тис. грн./рік.

$$E_{\text{сум}} = 438{,}256 + 356{,}20 + 4091{,}94 = 4886{,}396 \text{ тис. грн./рік}$$

Розрахуємо сумарні капітальні інвестиції, необхідні для реалізації комплексного проекту:

$$K_{\text{сум}} = K_1 + K_2 + K_3 \tag{3.11}$$

де K_1, K_2, K_3 — капітальні витрати на реалізацію відповідних індивідуальних заходів, тис. грн.

$$K_{\text{сум}} = 4{,}368 + 390{,}519 + 5754{,}154 = 6149{,}041 \text{ тис. грн.}$$

Визначимо інтегральний простий термін окупності для всього комплексу модернізаційних робіт за формулою:

$$T_{\text{ок}} = \frac{K_{\text{сум}}}{E_{\text{сум}}} \tag{3.12}$$

$$T_{\text{ок}} = \frac{6149{,}041}{4886{,}396} \approx 1{,}26 \text{ року}$$

Аналіз отриманих фінансових показників свідчить про те, що загальний термін окупності знаходиться в межах високої інвестиційної привабливості для промислових енергоощадних проектів. Усі три складники комплексного плану мають відмінні показники фінансової спроможності: їхня чиста теперішня вартість (NPV) є глибоко додатною, а внутрішня норма рентабельності (IRR) багаторазово перевищує базову вартість капіталу.



Рисунок 3.1 - Техніко-економічні показники проектів

Для наочного порівняння параметрів ефективності окремих рішень та їхніх узагальнених показників техніко-економічні результати зведено в таблицю 3.13.

Таблиця 3.13 – Техніко-економічні показники комплексного енергозберігаючого проекту

№ з/п	Найменування енергозберігаючого заходу	Обсяг інвестицій, тис. грн	Річна економія електроенергії, тис. кВт·год	Річний фінансовий ефект, тис. грн	Простий термін окупності, років
1	Впровадження частотно-регульованих приводів кранів з блоками рекуперації	5 754,154	1 573,824	4 091,94	1,41
2	Оптимізація потужності приводів димососів сталеплавильних печей	390,519	137	356,2	1,1
3	Модернізація насосного комплексу системи охолодження печей	4,368	168,56	438,256	0,01
—	Всього за комплексним проектом	6 149,041	1 879,384	4 886,396	1,26

ВИСНОВКИ

У межах виконаної роботи здійснено детальний аналіз поточного енергоспоживання сталеплавильного цеху та розраховано перспективні інженерні напрямки щодо оптимізації витрат на покупні енергоресурси, зокрема електричну енергію. Практична інтеграція запропонованих рішень дозволить підприємству досягти таких результатів:

1. Впровадження сучасних частотно-регульованих приводів кранового господарства спільно з напівпровідниковими блоками рекуперації забезпечує ефективне гальмування двигунів у генераторному режимі та гарантує стабільне повернення в електричну мережу заводу суттєвої частки раніше спожитої енергії.

2. Запропонована схема модернізації алгоритмів керування роботою насосного обладнання системи охолодження печей дає змогу гнучко обмежувати роботу агрегатів у періоди тривалих технологічних простоїв, усуваючи нераціональні витрати активної потужності.

3. Проведений аналіз навантаження високовольтних приводів димососів газоочистки виявив суттєве заниження їхнього фактичного коефіцієнта використання, у зв'язку з чим розраховано та обґрунтовано доцільність їхньої заміни на оптимізовані за номіналом двигуни типу AIP355S6 відповідної потужності.

4. Загальні капіталовкладення в реалізацію комплексного енергоощадного проекту становлять близько 6,15 млн грн, забезпечуючи щорічний сумарний економічний ефект у розмірі понад 4,88 млн грн. Інтегральний термін окупності комплексних інвестицій не перевищить 1,26 року, що беззаперечно свідчить про високу інженерно-економічну доцільність та фінансову спроможність усіх запропонованих рішень.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Пивняк Г. Г., Волков А. В. Сучасні частотно-регульовані асинхронні електроприводи з широтно-імпульсною модуляцією. Дніпропетровськ : НГУ, 2006. 422 с.

2. Закладний О. М., Проховнік А. В., Соловей О. І. Енергосбереження засобами промислового електроприводу : навч. посіб. Київ : Кондор, 2005. 408 с.

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

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

5. Малиновський А. О. Загальна електротехніка : підручник. Львів : Бескид Біт, 2003. 338 с.

6. Денисенко Т. О. Енергетичний менеджмент на промислових підприємствах : навч. посіб. Київ : Каравела, 2009. 264 с.

7. Праховник А. В., Соловей О. І. Енергетичний менеджмент : підручник. Київ : КВІЦ, 2001. 472 с.

8. Синяк М. О., Федоренко В. М. Автоматизація технологічних процесів у металургії : навч. посіб. Запоріжжя : ЗНТУ, 2012. 198 с.

9. Козирєв С. К. Насосні та вентиляторні установки металургійних підприємств : навч. посіб. Донецьк : ДонНТУ, 2010. 186 с.

10. Василевський О. М., Кухарчук В. В. Електротехнічні системи та комплекси промислових підприємств. Вінниця : ВНТУ, 2011. 230 с.

11. Желєзко Ю. С. Вибір заходів щодо зниження втрат електроенергії в електричних мережах : практ. посіб. Київ : Техніка, 2005. 112 с.

12. Клименко Б. В. Електричні апарати. Електромагнітні апарати керування та комутації : навч. посіб. Харків : Точка, 2012. 340 с.

13. Розен В. П., Соловей О. І. Рекуперація та вторинні енергетичні ресурси в промисловості. Київ : Еко-Інформ, 2007. 215 с.

14. Кузнєцов Ф. Д., Борцов Ю. А. Енергоефективні системи регулювання кранового електроприводу. Одеса : Астропринт, 2008. 154 с.

15. Сабадаш О. В. Частотно-регульований гідропривод у системах оборотного водопостачання промислових майданчиків. Кривий Ріг : КНУ, 2014. 142 с.

16. Мельничук В. А. Багатотарифні системи комерційного обліку електричної енергії та потужності. Львів : Світ, 2011. 204 с.

17. Маляр В. С. Електричні машини : навчальний посібник. Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2018. 384 с.

18. Васюра А. С. Електропривод та електрообладнання типових загальнопромислових установок : навчальний посібник. Вінниця : ВНТУ, 2010. 211 с.

19. Приймак Б. І. Комп'ютерне керування електроприводами : навчальний посібник. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 220 с.

20. Кулик Ю. А. Електричні машини та апарати металургійних підприємств : підручник. Дніпро : НМетАУ, 2015. 296 с.