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 Леонов Олександр Вікторович_Підвищення енергоефективності технологічних процесів металообробного цеху

Виконав: студент __4___ курсу гр. 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)
_____ Леонов О.В._____
(ініціали та прізвище)

Керівник ___д.т.н., проф. Биковський О.Г.
(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

_____Леонову Олександру Вікторовичу _____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1 Тема роботи _Підвищення енергоефективності технологічних процесів металообробного цеху
2 керівник роботи ___Биковський О.Г..д.т.н., проф._____
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом ЗНУ від «_23_» грудня__2025__року №_1833 - с_____
3 Строк подання студентом роботи _____11 червня 2026 р._____
4 Вихідні дані до роботи: Структура споживання за видами навантаження: Електродвигунне навантаження: 946 кВт (66,1% від загальної потужності): Металорізальні верстати: 518 кВт (36,2%). Вентиляційне обладнання ділянок: 311 кВт (21,7%). Насосне обладнання: 117 кВт (8,2%).
5 Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1) Дослідження шляхів підвищення енергоефективності виробничих процесів у цеху металообробки 2) Переосновлення та техніко-економічне моделювання ефективності енергозберігаючих заходів 3) Техніко-економічне обґрунтування та фінансовий аналіз реалізації енергозберігаючих заходів
6 Перелік графічного матеріалу _1) Аналіз електроспоживання та структура споживачів електричної енергії 2) Принципова однолінійна схема електропостачання 3) Схема розташування технологічного та електротехнічного

обладнання на плані 4) Зовнішній вигляд та конструктивно-компонувальна схема вентиляційної/технологічної установки.

7 Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділ 1	Биковський О.Г. д.т.н. проф		
Розділ 2	Биковський О.Г. д.т.н. проф		
Розділ 3	Биковський О.Г. д.т.н. проф		

8 Дата видачі завдання 01.02.2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Дослідження шлчхів підвищення енергоефективності виробничих процесів у цеху металообробки	01.03.2026	
2	Переосновлення та техніко-економічне моделювання ефективності енергозберігаючих заходів	01.04.2026	
3	Техніко-економічне обґрунтування та фінансовий аналіз реалізації енергозберігаючих заходів	10.05.2026	

Студент _____ (підпис) О.В. Леонов (ініціали та прізвище)

Керівник роботи _____ (підпис) О.Г.Биковський (ініціали та прізвище)

Нормоконтроль пройдено

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

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка містить 56 сторінок, 8 рисунків, 12 таблиць, 25 джерел.

Об'єктом дослідження виступає промислове підприємство із високим рівнем споживання паливно-енергетичних ресурсів.

Предмет дослідження охоплює процеси підвищення енергоефективності виробництва, а також оцінку техніко-економічної доцільності інтеграції енергозберігаючих технологій.

Метою дипломного проєкту є розробка комплексних рішень щодо зростання рівня енергоефективності підприємства та обґрунтування доцільності впровадження сучасних енергозберігаючих заходів.

У загальнотехнічній частині виконано розрахунок втрат активної потужності та електричної енергії в елементах системи електропостачання, на основі чого обґрунтовано низку технічних заходів: перекомпоновку малозавантажених асинхронних двигунів на агрегати меншої номінальної потужності, автоматизацію систем керування вентиляційним комплексом, заміну застарілих вентиляторних установок на сучасні аналогами з підвищеним ККД та оптимізацію кінематичних схем електропривода шляхом виключення проміжних передач.

У розділі економічних розрахунків здійснено комплексний аналіз інвестиційної привабливості запропонованих проєктів. Визначено ключові показники ефективності, зокрема чисту приведену вартість (NPV), внутрішню норму рентабельності (IRR) та дисконтований термін окупності капітальних вкладень.

ЧИСТА ТЕПЕРІШНЯ ВАРТІСТЬ (NPV), ВНУТРІШНЯ НОРМА РЕНТАБЕЛЬНОСТІ (IRR), ТЕРМІН ОКУПНОСТІ,

ЗМІСТ

Вступ……..……. 7
1. Дослідження шляхів підвищення енергоефективності виробничих процесів у цеху металообробки……...10
1.1 Основні аспекти енергозбереження на виробництві 10
1.2 Чинники впливу на оптимізацію та зменшення витрат енергії 12
1.3 Загальний огляд та техніко-комерційний профіль об'єкта дослідження 15
1.4 Структурна класифікація та характеристика споживачів електричної енергії підприємства 17
1.5 Комплексний аналіз режиму електроспоживання підприємства 18
1.5.1 Технічна характеристика встановлених електроприймачів та установок 18
1.5.2 Динаміка показників електроспоживання та обсягів витрат підприємства 22
1.6 Стратегічні напрямки та техніко-організаційні інструменти підвищення енергоефективності підприємства 25
1.6.1 Модернізація приводу вентиляторних установок шляхом впровадження енергоефективних електродвигунів 25
1.6.2 Техніко-економічне обґрунтування необхідності компенсації реактивної потужності 27
1.6.3 Автоматизація управління вентиляторними та компресорними комплексами ……. 28
1.6.4 Обґрунтування інтеграції сучасних систем комерційного та технічного обліку (АСКОЕ) 33
2. Переосновлення та техніко-економічне моделювання ефективності енергозберігаючих заходів……...36

2.1 Перерахунок та оптимізація параметрів замін малозавантажених асинхронних двигунів 36
2.2 Виключення проміжних передач зі структури електропривода 37
2.3 Модернізація та заміна застарілого вентиляторного обладнання 38
2.4 Впровадження автоматизованого управління вентиляторними комплексами 39
2.5.Визначення параметрів і вибір засобів вимірювання енергоспоживання 40
3. Техніко-економічне обґрунтування та фінансовий аналіз реалізації енергозберігаючих заходів……...44
3.1 Розрахунок економічного ефекту від впровадження енергозберігаючих ініціатив 44
3.1.1 Оцінка економічної ефективності заміни асинхронних двигунів агрегатами меншої потужності 44
3.1.2 Виключення проміжних передач зі структури електропривода .. 44
3.1.3 Заміна застарілих вентиляторів на сучасні високоефективні аналоги 45
3.1.4 Впровадження автоматизованого управління вентиляторними комплексами ……..... 46
3.2 Фінансовий аналіз ефективності інвестиційного проєкту та кошторис впровадження 47
3.3 Джерела фінансування проєкту та аналіз грошових потоків 47
Висновки……..…….…….....52
Перелік посилань……...…….….53

ВСТУП

Проблема раціонального використання та збереження енергетичних ресурсів набула виняткової актуальності для кожного учасника сучасного суспільства. Обсяги традиційних природних запасів неухильно скорочуються, тоді як видобуток і транспортування енергоносіїв стають дедалі складнішими та технічно небезпечнішими процесами. Оскільки масштабне впровадження альтернативної енергетики на території України поки що перебуває на етапі становлення, головним практичним інструментом залишається цілеспрямована економія енергоресурсів. У глобальній енергетиці спостерігається стійка тенденція до постійного зростання попиту на електричну та теплову енергію, і навіть прискорений перехід на інноваційні енергозберігаючі технології не зможе повністю нівелювати цю потребу в найближчі десятиліття.

Для більшості розвинених держав енергозбереження є базовим пріоритетом державної політики, оскільки підвищення ефективності витрачання паливно-енергетичних ресурсів безпосередньо визначає конкурентоспроможність та економічну незалежність країни. Головна стратегічна мета національної економіки полягає в оптимізації енергоспоживання за збереження високого інтелектуального й виробничого потенціалу нації та задоволенні ринкового попиту. Сучасний етап розвитку промисловості вимагає переходу від екстенсивних методів господарювання до якісного управління енергетичними потоками на основі точного приборного обліку, цифрового моделювання та систематичного аудиту всіх технологічних переділів.

У межах промислового підприємства потенціал енергозбереження слід розглядати як комплекс взаємопов'язаних внутрішніх і перспективних можливостей, а також мобілізаційних здібностей персоналу та керівництва, спрямованих на раціональне перетворення вхідних ресурсів. Проте на мікрорівні процес реалізації таких заходів часто стримується дефіцитом інвестиційного

фінансування, постійним зростанням тарифів і браком профільних фахівців. Вагомим резервом зниження витрат є зменшення втрат у проміжних ланках електромереж та обладнанні, де втрати енергії можуть сягати від 21% до 45%.

Ефективне управління енергоспоживанням на рівні окремого суб'єкта господарювання передбачає впровадження системного підходу, що охоплює:

- детальний інструментальний і розрахунковий аналіз структури навантажень;
- оперативне виявлення та усунення дисбалансів у розподільчих мережах;
- модернізацію силового електропривода з урахуванням реальних графіків технологічного завантаження;
- автоматизацію режимів роботи допоміжного обладнання (компресорних, насосних та вентиляторних станцій).

Предметом цього проєкту є комплексний аналіз електроспоживання та розробка техніко-економічного обґрунтування енергозберігаючих заходів. Практична реалізація запропонованих рішень дозволить суттєво скоротити щорічне споживання електричної енергії підприємством, знизити собівартість випущеної продукції та підвищити загальну ефективність господарювання.

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішуються такі ключові завдання:

1. Досліджено структуру та динаміку споживання електричної енергії основними технологічними переділами та цехами підприємства за звітні періоди.
2. Проведено аналіз фізичного та морального зносу силового електрообладнання, зокрема асинхронних двигунів і вентиляторних систем.
3. Виконано технічні розрахунки потенціалу економії енергії від заміни малозавантажених двигунів, усунення зайвих проміжних механічних передач та оптимізації роботи вентиляційних агрегатів.
4. Обґрунтовано вибір сучасних засобів вимірювальної техніки, багатотарифних лічильників та телекомунікаційних модулів для розширення системи АСКОЕ.

5. Здійснено детальний фінансовий аналіз інвестиційних проєктів, розраховано показники чистого приведеного прибутку (NPV), внутрішньої норми рентабельності (IRR) та термінів окупності за різних сценаріїв кредитного фінансування.

1 ДОСЛІДЖЕННЯ ШЛЯХІВ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ВИРОБНИЧИХ ПРОЦЕСІВ У ЦЕХУ МЕТАЛООБРОБКИ

1.1 Основні аспекти енергозбереження на виробництві

У сучасній фаховій літературі під поняттям енергозбереження прийнято розуміти організаційну, наукову, практичну та інформаційну діяльність, яка орієнтована на раціональне використання і заощадження первинних і перетворених видів енергії, а також природних енергетичних ресурсів у межах народного господарства через задіяння правових, економічних і технічних методів. Будь-який корисний цільовий ефект (створення продукту чи виконання робіт) нерозривно пов'язаний із витратами енергії, тому економія паливно-енергетичних ресурсів (ПЕР) є найважливішим завданням для промисловості України.

Нераціональне витрачання енергії тягне за собою додаткові витрати інших видів ресурсів. При низькій ефективності використання енергії знижується кінцевий корисний ефект, що призводить до посилення зворотного потоку енергії через матеріальні та інші витрати, які необхідні для розвитку й експлуатації енергетичних систем. У періоди помірного енергоспоживання та наявності великих природних запасів питанню ефективності ПЕР часто не приділяють належної уваги, проте згодом це неминуче викликає дефіцит енергії.

Енергетична залежність України від поставок ПЕР у 2003–2004 роках становила 60,7%, тоді як у країнах ЄС цей показник у середньому дорівнював 45%. Близьку занепокоєливу енергозалежність мали Німеччина (61,4%), Франція (50%) та Австрія (64,7%), тоді як Японія використовувала власні первинні ПЕР лише на рівні близько 7%. У наступні роки енергозалежність України дещо зменшилася (з 60,7% у 2015 році до 54,8% у 2016 році), проте вона характеризується гострою відсутністю диверсифікації джерел постачання нафти, природного газу та ядерного палива.

За структурою споживання первинної енергії в Україні найбільшу частку займав природний газ — 41% (39% у 2016 році), тоді як у світі цей показник становить 21%. Питома вага нафти в Україні складала 19% (у світі — 35%), вугілля — 19% (у світі — 23%), урану — 17% (у світі — 7%), а гідроресурсів та інших відновлювальних джерел — лише 4% (у світі — 14%). Дефіцит якісного вугілля та торфобрикетів змушує заміщувати їх природним газом, що ще більше посилює енергозалежність держави. У зв'язку з цим доцільно проводити техніко-економічні розрахунки щодо заміщення газу на електроенергію, зокрема в зонах розташування АЕС, у віддалених населених пунктах та при опаленні новобудов.

Рівень енергозабезпеченості країни оцінюється через питоме споживання первинної енергії на одну особу. У 2005 році цей показник для України становив 4,5 т у.п./люд., що значно поступалося США (15,6 т у.п./люд.), Японії (6,3 т у.п./люд.) та країнам ЄС-15 (6,4 т у.п./люд.), але випереджало індустріальні країни, що розвиваються (КНР — 1,2, Індія — 0,5, Туреччина — 1,8 т у.п./люд.). Водночас питоме річне споживання електричної енергії в Україні у 2005 році становило 3789 кВт·год/людину (у 1990 році — 5198 кВт·год/людину), що у 2–3 рази нижче, ніж у розвинених країнах світу (США — 12792, Японія — 7727, ЄС-15 — 6813 кВт·год/людину). Відставання зумовлене різким спадом виробництва у 90-х роках, хоча починаючи з 2000 року спостерігається стійка тенденція до зростання.

Енергомісткість ВВП України становить 0,89 кг умовного палива на 1 долар США (з урахуванням паритету купівельної спроможності), що в 2,6 раза перевищує середній світовий показник (0,35 кг у.п./$). Головними причинами такої ситуації є технологічне відставання економіки, незадовільна галузева структура, дефіцит цільових інвестицій та вплив тіньового сектору. Економія енергії забезпечується зміною структури виробництва, впровадженням високоефективного обладнання, оптимізацією норм та зниженням втрат. Окрім економічного ефекту, енергозбереження є єдиним безпечним шляхом для захисту навколишнього середовища в довгостроковій перспективі.

З огляду на вимоги Закону України «Про основи національної безпеки України», неефективне використання ПЕР визнано реальною загрозою стабільності в суспільстві. Висока енергомісткість ВВП стримує економічний розвиток, зумовлює хронічну залежність від імпорту, перешкоджає європейській інтеграції, ускладнює вирішення соціальних проблем та погіршує екологію. Для виправлення ситуації необхідно на державному рівні вжити першочергових заходів:

- Прийняти нову редакцію Закону України «Про енергоефективність» замість застарілого законодавства.
- Створити дієву систему державного управління та контролю у сфері енергоефективності.
- Запровадити енергетичне маркування продукції, енергоменеджмент, сертифікацію та обов'язковий енергоаудит.
- Встановити обов'язковість комерційного обліку ресурсів.
- Запровадити пільгове кредитування енергозберігаючих заходів та національні стандарти енергоефективності.

Міжнародний досвід показує, що політика енергозбереження базується на ринкових стимулах, компенсації недоліків ринку та виконанні міжнародних екологічних зобов'язань (зокрема Кіотського протоколу). В Україні також активно розвивається ринок енергосервісних компаній (ЕСКО), які фінансують модернізацію за рахунок досягнутої економії, та здійснюється співробітництво з європейськими і міжнародними фінансовими організаціями (ЄБРР, ЄК, ПРООН, ГЕФ).

1.2 Чинники впливу на оптимізацію та зменшення витрат енергії

Ефективність використання енергоресурсів на підприємстві визначається динамікою відповідних показників, для оцінки яких необхідно виявити ключові

фактори впливу. Усі фактори поділяються на внутрішні (внутрішньозаводські) та зовнішні по відношенню до промислового підприємства. Класифікацію факторів та напрямків інвестицій в енергозбереження наведено в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 — Класифікація факторів ефективності енергоспоживання та напрямків інвестицій в енергозбереження

Група факторів	Характер напрямку	Напрямки енергозбереження / Характеристика
Внутрішні фактори (підвищення технічного рівня виробництва)	Комплексні	Впровадження нової енергозберігаючої техніки та нових технологій.
	Часткові	Удосконалення діючої техніки й технології, поліпшення якості енергоресурсів,
Удосконалення організації використання енергоресурсів	Комплексні	Оптимізація структури споживаних енергоресурсів, оптимальний розподіл енергетичних навантажень, використання вторинних енергетичних ресурсів (ВЕР).
Удосконалення організації виробництва і праці	Комплексні	Поліпшення організації й структури виробництва, максимальне завантаження енергоспоживаючого устаткування.
	Часткові	Зміна обсягу виробництва окремих видів продукції, скорочення втрат від браку, удосконалення організації та підвищення якості ремонтів енергоспоживаючого устаткування.

До внутрішніх факторів належить зміна обсягу і структури виробництва продукції. При збільшенні випуску менш енергоємної продукції показник енергомісткості зменшується. Також важливе значення має технічний рівень

виробництва, повнота завантаження обладнання та організація обліку й стимулювання.

Зовнішні фактори не залежать від діяльності підприємства та поділяються за рівнем управління на народногосподарські, галузеві й регіональні, а за характером впливу — на ринкові (структура цін на енергоносії, наявність ресурсів на ринку, енергоспоживання конкурентів) та екологічні (плата за викиди). Усі фактори реалізуються через екстенсивні та інтенсивні шляхи. Особливу цінність має інтенсивний шлях, який забезпечує ріст ефективності за рахунок фондозберігаючих форм інтенсифікації без необхідності здійснення великих капіталовкладень.

У 2024–2025 роках державні органи та підприємства активізували роботу з реалізації науково-технічної політики енергозбереження. Зокрема, у цукровій галузі передовим підприємством став Чортківський цукрозавод завдяки підптимуванню теплової схеми для використання тепла низьких потенціалів. Протягом І півріччя 2024–2025 років в Україні за рахунок енергозберігаючих заходів було зекономлено біля 2,6 млн тонн паливно-енергетичних ресурсів (78,6% від річного завдання). Основні напрямки заходів охоплювали встановлення нових котлів, реконструкцію котелень, оптимізацію режимів роботи, встановлення приладів обліку, використання ВЕР та заміну електродвигунів.

Важливим напрямком залишається когенерація (комбіноване виробництво теплової та електричної енергії), потенціал якої на промислових підприємствах України становить близько 1000 МВт. Розвиток когенерації дозволяє підвищити енергонезалежність регіонів, мінімізувати транспортні витрати, зменшити витрати місцевих бюджетів на імпортний газ та створити нові робочі місця. Державні комітети та відомства також розробляють цільові програми (наприклад, «Тепло — дітям») для покращення теплопостачання соціальних закладів.

Однак енергомісткість ВВП України у 2024–2025 роках все ще залишається високою через тінєзацію економіки, недоліки ціноутворення,

монополізацію ринків ПЕК та житлово-комунального господарства, високу вартість кредитів і недобросовісність власників підприємств, які перекладають витрати на інших споживачів. До найнебезпечніших внутрішніх загроз енергетичній безпеці належать надмірна енергомісткість ВВП, спрацювання потужностей ПЕК, нестача інвестицій та відсутність повного ядерного циклу, а до зовнішніх — монополізація імпорту енергоносіїв. Стратегія енергозбереження на 2024–2025 роки спрямована на усунення цих загроз, диверсифікацію джерел постачання та розвиток нетрадиційної енергетики.

1.3 Загальний огляд та техніко-комерційний профіль об'єкта дослідження

Суб'єкт господарювання ППідприємствоуспішно функціонує на ринках України та держав СНД із 1994 року. Ключовим напрямом діяльності компанії є постачання, а також часткове виробництво та глибока модернізація такого промислового обладнання:

- Вантажопідйомне устаткування.
- Гірничо-шахтні комплекси.
- Вентиляторні системи промислового призначення.
- Компресорні установки.
- Блочно-модульні котельні.

Компанія спеціалізується на комплексних поставках важкого електротехнічного устаткування, зокрема гірничошахтного профілю. Підприємство володіє великим практичним досвідом зовнішньоекономічної діяльності щодо імпорту продукції з Німеччини, а також здійснює складний капітальний ремонт рудничних електровозів типу ОПЕ-1АМ та іншого специфічного обладнання.

ППідприємствоє активним учасником Корпорації підприємств міського електротранспорту України «Укрелектротранс». Компанії офіційно надано

статус дилера ВАТ «Красногвардійський крановий завод» (згідно з договором № Д7 від 23.01.2009 р.), а також партнерські повноваження від ДП «Чернівецький металообробний завод» (виробництво блочно-модульних котельнь) та німецького концерну HEIZA Wärmetechnik GmbH (котлы з високотемпературним органічним теплоносієм). Наявність офіційної ліцензії Державного комітету України з будівництва та архітектури (серія АБ № 204714) дозволяє підприємству легально виконувати повний цикл проєктних, будівельних, монтажних і пусконалагоджувальних робіт. За результатами діяльності у попередні періоди оргкомітетом Національного Бізнес Рейтингу НВП «Енергокомплект» компанію було визнано лідером у галузі оптової торгівлі машинами й устаткуванням за ключовими критеріями «Обсяг реалізованої продукції», «Заробітна плата» та «Продуктивність праці».

Деталізована номенклатура матеріально-технічних ресурсів, що постачаються та обслуговуються підприємством, включає:

– Вантажне обладнання: ручні лебідки, кішки тип А та тип Б, монтажні тягові механізми вантажопідйомністю 0,5 т і 1,5 т, ручні черв'ячні талі, мостові ручні й електричні крани, крани-штабелери, а також консольні крани.

– Гірничо-шахтне устаткування: бурові верстати (включно з підземними модифікаціями), скреперні та шахтні допоміжні лебідки, змінні бурові коронки й штанги, спеціалізовані насоси для пневмоударників та пристрої з пневматичним приводом, переносні бурові установки, контактні рудничні електровози, а також копрові шківи.

– Вентиляторне обладнання: шахтні вентилятори локального провітрювання марок ВМЕ-5, ВМЕ-6, ВМЕ-6-1, ВМЕ-8, ВМЕ-12А; осьові вентилятори серій ВО 16, ВО 16Е, ВО 16А; промислові димососи Д18; комбіновані пиловловлювачі ПК 35; центробіжні вентилятори ВЦ 15.

– Компресорне обладнання: стаціонарні гвинтові компресори SE і SEC; установки серії ALBERT; гвинтові компресори SEC Vario, оснащені регульованим приводом; поршневі компресори БОББІ; мобільні гвинтові

компресори PD та PDP; розчинонасоси; комплексні фільтруючі елементи, осушувачі й сепаратори для підготовки стисненого повітря.

– Блочно-модульні котельні: модульні котельні установки на твердому, газоподібному та рідкому паливі.

– Електротехнічне обладнання: силові випрямлячі, вимірювальні трансформатори струму, індуктивні реактори.

1.4 Структурна класифікація та характеристика споживачів електричної енергії підприємства

Споживачі електричної енергії у промисловому секторі класифікуються за способом перетворення електроенергії в інші фізичні види на такі ключові категорії:

Загальнопромисловий електропривод, у межах якого відбувається трансформація електричної енергії в механічну роботу. Такі споживачі наявні на всіх виробництвах і використовують широкий спектр двигунів потужністю від часток кіловата до сотень кіловат і вище.

Група електротехнологічних установок, яка поділяється на підкатегорії:

– Електротермічні устаткування (перетворення електричної енергії на теплову: печі опору, індукційні й дугові установки, агрегати електрошлакового переплаву, електронно-променевий нагрів, контактне та дугове зварювання).

– Електрохімічні комплекси (перетворення електричної енергії на хімічну енергію: установки електролізу, гальванічні лінії, анодування, електрохімічна обробка).

– Електрофізичні системи (перетворення електроенергії на специфічні види механічної чи фізичної дії для обробки виробів: ультразвукові установки, магнітно-імпульсні верстати, електростатичні фільтри).

– Освітлювальні установки (перетворення електричної енергії на світлове випромінювання за допомогою ламп розжарювання, люмінесцентних та газорозрядних джерел).

Окремим важливим видом навантаження є системи вентиляції виробничих цехів та приміщень, під якими розуміють комплекс обладнання й заходів для організації повітрообміну відповідно до будівельних норм (СНіП) з метою підтримки заданих метеопараметрів середовища. Системи вентиляції класифікуються за такими ознаками:

– За способом створення тиску повітря: з природним або штучним (механічним) побудженням.

– За функціональним призначенням: приточні чи витяжні.

– За зоною обслуговування: місцеві або загальнообмінні.

– За конструктивним виконанням: канальні чи безканальні.

1.5 Комплексний аналіз режиму електроспоживання підприємства

1.5.1 Технічна характеристика встановлених електроприймачів та установок

Головними споживачами електричної енергії на підприємстві виступають профільне технологічне та зварювальне устаткування, які одержують живлення від трифазної мережі змінного струму промислової частоти 50 Гц з номінальною напругою 0,38 кВ. Окрім цього, проєктною документацією передбачено організацію загального робочого та аварійного освітлення з робочою напругою 220 В.

Структурний розподіл споживання електричної енергії за профільними категоріями виглядає наступним чином: на електродвигунне навантаження

припадає 66%, на процеси термообробки — 24%, а на електротермічні установки — 9,9%.

Основні електроприймачі підприємства:

– Технологічне устаткування загальною кількістю близько 180 одиниць (металорізальні верстати, преси, електропічні агрегати, а також 4 стаціонарні компресори для виробництва стисненого повітря).

– Зварювальне обладнання загальним парком близько 100 одиниць, серед яких виділяються зварювальні випрямлячі марок ВС-600 (9 шт.), ВДУ-506У (14 шт.), КИУ-501 (8 шт.), ВДУЧ-350 (3 шт.), ВДМ-1001 (6 шт.), обладнання «КЕМРІ» (1 шт.), ВДУ-1201 (2 шт.), ВКСМ-1000 (1 шт.), ВДУ-504 (4 шт.), ВДУ-1202 (2 шт.), установки напівавтоматичного зварювання MIG/MAG типу ВАРІО СТАР 457/2 (2 шт.), обладнання дугового зварювання УДГУ-251 AC/DC (1 шт.) та УДГУ-301, а також 2 установки газоплазмового різання типу ППлКП.

Вантажопідйомні мостові кран-балки.

Освітлювальне господарство: виробничі цехи обладнані світильниками з люмінесцентними та дуговими ртутними лампами ДРЛ-1000 та ДРЛ-700 (70 шт.), ДРЛ-400 (30 шт.) і ДРЛ-250 (10 шт.); освітлення периметральної зони реалізовано на базі ламп ДРЛ-250 (30 шт.) та ДРЛ-125 (30 шт.); в адміністративно-побутових приміщеннях встановлено світильники з лампами ЛБ-36 (50 шт.), а в допоміжних санітарних вузлах та об'єктах КНС — лампи розжарювання (50 шт.).

Вентиляційний комплекс, що налічує 20 приточних та витяжних вентиляційних агрегатів одиничною електричною потужністю від 3 до 20 кВт.

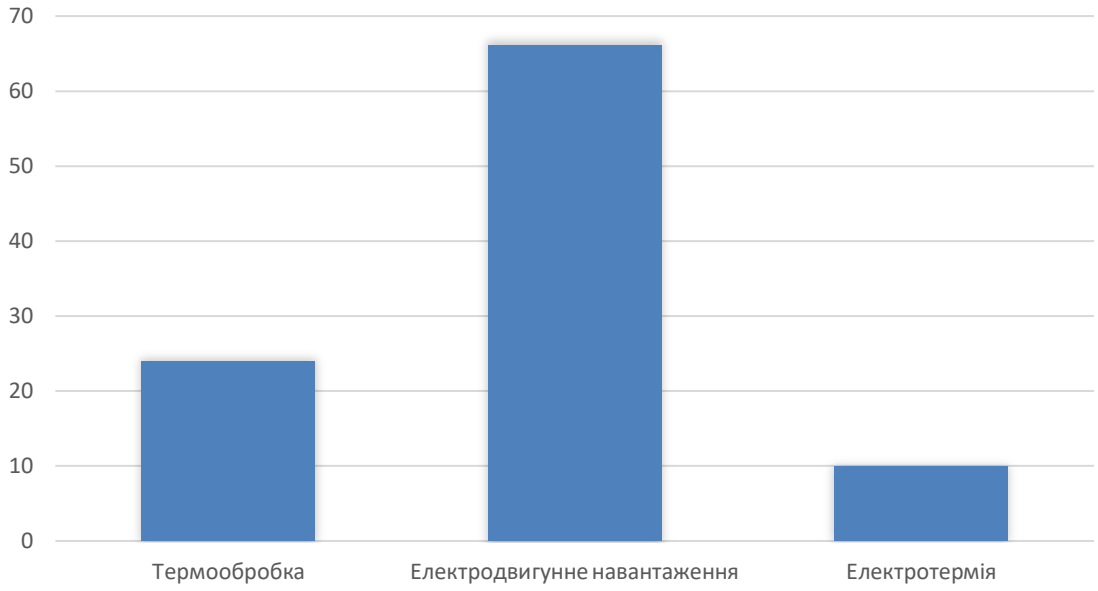


Рисунок 1.5 – Структура енергоспоживання устаткування (графічне представлення)

Технологічне обладнання загальною кількістю близько 180 одиниць, серед яких металорізальні верстати, преси, електричні печі та 4 стаціонарні компресори стисненого повітря.

Зварювальне обладнання загальною кількістю близько 100 одиниць, зокрема зварювальні випрямлячі марок ВС-600 (9 шт.), ВДУ-506У (14 шт.), КИУ-501 (8 шт.), ВДУЧ-350 (3 шт.), ВДМ-1001 (6 шт.), обладнання «КЕМРІ» (1 шт.), ВДУ-1201 (2 шт.), ВКСМ-1000 (1 шт.), ВДУ-504 (4 шт.), ВДУ-1202 (2 шт.), а також установки для зварювання MIG/MAG ВАРІО СТАР 457/2 (2 шт.), обладнання дугового зварювання УДГУ-251 AC/DC (1 шт.), УДГУ-301 та 2 газоплазморізальні машини ППлКП.

Кран-балки для вантажопідйомних робіт.

Освітлювальне обладнання, що включає світильники з люмінесцентними лампами типу ДРЛ-1000 та ДРЛ-700 (70 шт.) і ДРЛ-400 (30 шт.) та ДРЛ-250 (10 шт.) у виробничих цехах; освітлення периметра на базі ламп ДРЛ-250 (30 шт.) та ДРЛ-125 (30 шт.); освітлення в адміністративних і побутових приміщеннях за допомогою ламп ЛБ-36 (50 шт.), а також ламп розжарювання в туалетах, КНС та побутових приміщеннях (50 шт.).

Вентиляційні установки (приточні та витяжні системи потужністю 3–20 кВт у кількості 20 шт.).

Процентне співвідношення витрат електричної енергії на живлення споживачів ППідприємствонаведено в таблиці 1.3.

Таблиця 1.3 – Структура споживачів

№ п\п	Вид навантаження	Потужність, кВт	Відсоткове співвідношення
1	Загальна потужність електрообладнання, кВт	1485	100
2	Термообробка, кВт:	356	24
3	печі опору	118	7,9
4	нагрівальні пристрої	116	7,8
5	електрозварювання	122	8,2
6	Електродвигунне навантаження, кВт:	982	66,1
7	металорізальні верстати	538	36,2
8	насосне обладнання	122	8,2
9	вентиляція ділянок підприємства	322	21,7
10	Освітлення	147	9,9
11	зовнішнє освітлення	25	1,7
12	внутрішнє освітлення	122	8,2

Після порівняльної характеристики потужності споживачів електроенергія на промислових підприємствах широко застосовується для приводів різноманітних механізмів, освітлення та електротехнологічних комплексів (електротермічних, зварювальних і гальванічних установок). Як показують дані таблиці 1.3, найбільша питома вага електроспоживання припадає на асинхронні електродвигуни.

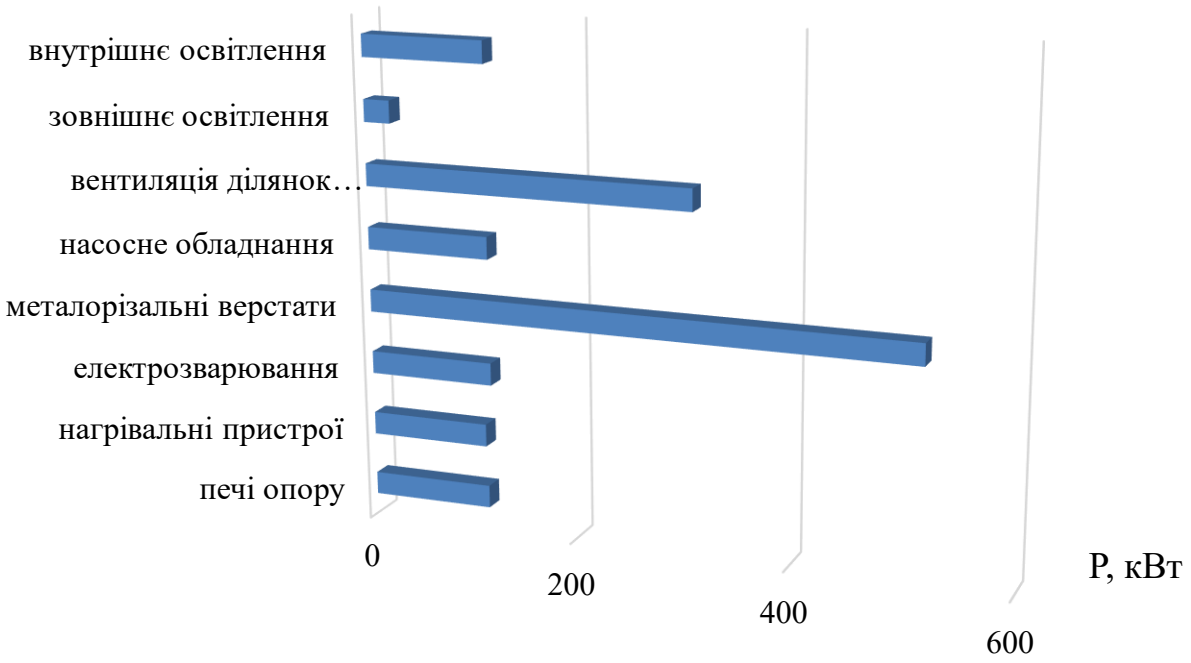


Рисунок 1.6 - Аналіз співвідношення потужностей споживачів обладнання

На промислових підприємствах електроенергія масово використовується для живлення приводів різноманітних механізмів, освітлювальних мереж, а також для специфічних електротехнологічних комплексів, таких як термічні, зварювальні установки та системи електролізу.

Дані таблиці 1.1 засвідчують, що значна частка загального енергоспоживання припадає на електродвигуни, серед яких переважають асинхронні агрегати.

1.5.2 Динаміка показників електроспоживання та обсягів витрат підприємства

Статистичні дані стосовно споживання електричної енергії та фінансових витрат підприємства у звітному періоді (2024–2025 роки) демонструють

стабільну тенденцію до планомірного збільшення енергоспоживання, що безпосередньо обумовлено розширенням номенклатурного ряду та нарощуванням загальних обсягів випуску товарної продукції. Розподіл помісячного споживання електроенергії і фінансових витрат за звітний період показує поступове зростання навантаження від 3,45 млн кВт·год (на суму 5,88 млн грн) у січні до 5,35 млн кВт·год (на суму 9,12 млн грн) у грудні, при цьому сукупний річний обсяг споживання досягає позначки 52,54 млн кВт·год із загальними фінансовими витратами на рівні 89,4 млн грн. Порівняльний аналіз із попередніми роками підтверджує стійке екстенсивне розширення енергоспоживання підприємства.

Таблиця 1.4 — Річне споживання електроенергії в 2024–2025 рр.

Місяць	Споживання електроенергії, млн кВт·год	Витрати, млн грн
Січень	3,45	5,88
Лютий	3,5	6
Березень	3,81	6,48
Квітень	3,94	6,72
Травень	4,11	6,96
Червень	4,29	7,32
Липень	4,47	7,56
Серпень	4,64	7,92
Вересень	4,82	8,16
Жовтень	5	8,52
Листопад	5,17	8,76

Таблиця 1.5 - Динаміка споживання електроенергії в 2022–2025 рр.

Роки	2022	2023	2024–2025
Споживання електроенергії, млн кВт·год	46,32	45,74	52,54
Витрати, млн грн	65,5	67,3	89,4

Протягом останнього трирічного періоду спостерігається стійка тенденція до зростання енергоспоживання підприємством, що безпосередньо зумовлено збільшенням обсягів виготовлення товарних виробів та диверсифікацією їх асортименту.



Рисунок 1.7 - Динаміка помісячного споживання електроенергії

Графік ілюструє поступове збільшення обсягів споживання електричної енергії від мінімальних значень у січні (3,45 млн кВт·год) до максимальних показників у грудні (5,35 млн кВт·год), що відображає сезонний характер навантаження та ріст виробничих потужностей підприємства.

1.6 Стратегічні напрямки та техніко-організаційні інструменти підвищення енергоефективності підприємства

1.6.1 Модернізація приводу вентиляторних установок шляхом впровадження енергоефективних електродвигунів

Зростання економічності масового нерегульованого електропривода, що проєктується під стабільні розрахункові умови функціонування, реалізується через перехід на спеціалізовані енергозберігаючі електродвигуни. Завдяки збільшенню маси активних матеріалів (мідних провідників та електротехнічної сталі) в таких агрегатах суттєво зростають номінальні показники коефіцієнта корисної дії. Комплексні конструктивні модифікації асинхронних двигунів із підвищеним ККД охоплюють:

- подовження статорного сердечника, що набирається з високоякісних пластин електротехнічної сталі зі зменшеними питомими втратами для зниження магнітної індукції;
- мінімізацію електричних втрат у міді шляхом максимального заповнення пазів та застосування провідників збільшеного перерізу в роторі й статорі;
- зменшення тепловиділення під час роботи, що дозволяє оптимізувати габарити охолоджуючого вентилятора та скоротити супутні аеродинамічні втрати потужності.

За умови тривалої експлуатації електродвигуна в режимі незмінного номінального навантаження такі конструкції гарантують найнижчі експлуатаційні витрати. Проте доцільність їх інтеграції вимагає ретельної оцінки з урахуванням сукупних витрат на монтаж і сервісне обслуговування. З урахуванням коригування вихідних показників у діапазоні 10–50%, економія електричної енергії від використання енергозберігаючих двигунів становить приблизно від 3,6% до 12% від загального споживання.

Стратегічні рішення визначають вектор енерготрансформації компанії на 3–10 років:

- Впровадження систем системного енергоменеджменту (ISO 50001): Перехід від разових заходів до постійного циклу «Плануй — Роби — Перевіряй — Вдосконалюй» (PDCA).
- Декарбонізація та автономізація (ВДЕ): Поступова інтеграція власних джерел генерації — дахових або наземних сонячних електростанцій (СЕС), систем накопичення енергії (BESS), біомасових котелень чи когенераційних установок.
- Цифровізація та Industry 4.0: Перехід на «розумне» підприємство, де енергоспоживання оптимізується в реальному часі за допомогою IoT-датчиків, штучного інтелекту та предиктивної аналітики.
- Економіка замкненого циклу (Circular Economy): Максимальне використання вторинних ресурсів — рекуперація скидного тепла, використання відходів виробництва як палива.

2. Техніко-технологічні інструменти

Це конкретні інженерні рішення, які дають швидкий і вимірюваний фізичний ефект зменшення споживання ресурсів:

Основні технічні заходи:

1. Частотно-регульовані приводи (ЧРП): Установка частотників на насоси, вентилятори та компресори дає від 20% до 50% економії електроенергії за рахунок регулювання обертів замість дроселювання.
2. Рекуперація вторинної енергії: Вловлювання тепла димових газів, гарячих стічних вод чи компресорного обладнання для підігріву мережевої води, повітря або сировини.
3. Модернізація стисненого повітря: Усунення витоків (які часто складають до 20–30% втрат), зниження робочого тиску та використання компресорів з регульованої частотою.

4. Світлодіодне (LED) освітлення та димування: Заміна застарілих ламп разом із датчиками присутності та рівня природного освітлення скорочує витрати на світло до 60–80%.
5. Теплоізоляція та аудити термографією: Ізоляція трубопроводів, арматури, технологічних ємностей та фасадів будівель.

3. Організаційно-управлінські інструменти

Без належної організації навіть найсучасніше обладнання швидко втрачає ефективність через людський фактор або неправильну експлуатацію.

Головне правило енергоменеджменту: «Неможливо управляти тим, що ви не вимірюєте». Деталізований автоматичний облік — це 50% успіху будь-якої програми енергоефективності.

1.6.2 Техніко-економічне обґрунтування необхідності компенсації реактивної потужності

Більшість промислових споживачів електрики складають індуктивні машини (трансформатори, генератори, приводи), у яких циркулює реактивний струм, що створює фазовий зсув між напругою та струмом. Підключене навантаження споживає не лише активну, а й реактивну енергію, що призводить до збільшення повної потужності в середньому на 22–38% відносно активної. У режимах мінімального завантаження (холостий хід) фазовий зсув зростає, а коефіцієнт потужності ($\cos \varphi$) знижується до 0,18–0,35.

Основним інструментом компенсації реактивної потужності (КРП) у цехових мережах є стаціонарні та автоматизовані конденсаторні установки (КУ). Вони мають низку ключових переваг:

- мінімальні та стабільні в зоні робочих температур втрати активної енергії, що не перевищують 0,45% або 0,0045 кВт/кВАр КУ (для порівняння: у

синхронних компенсаторах показник досягає 10%, а в двигунах перезбудження — 7%);

- повна відсутність рухомих та обертових елементів;
- відносно невисокі початкові капітальні вкладення;
- можливість точного підбору необхідної ємності та монтажу в будь-яких точках мережі;
- безшумність функціонування та простота технічного обслуговування.

Залежно від виробничих умов застосовують такі види компенсації:

1. Індивідуальна (нерегульована) — розміщується безпосередньо біля електроприймачів і комутується одночасно з ними, розвантажуючи внутрішні мережі.
2. Групова (нерегульована) — застосовується для групи індуктивних навантажень, що приєднуються до розподільних пунктів 0,38 кВ.
3. Централізована (регульована) — встановлюється на шинах низької або вищої напруги підстанцій для роботи зі змінним навантаженням протягом доби.

Застосування засобів КРП знижує споживаний із мережі струм на 33–60%, підтримує $\cos\varphi$ на рівні, близькому до одиниці, зводить до мінімуму плату за реактивну енергію, розширює пропускну здатність кабелів і трансформаторів без їх реконструкції та забезпечує економію активної електроенергії в межах 6–22%.

1.6.3 Автоматизація управління вентиляторними та компресорними комплексами

Реактивна потужність (Q, вар) необхідна для створення електромагнітних полів у двигунах та трансформаторах, але вона не виконує корисної роботи. Її циркуляція між джерелом та споживачем перевантажує мережу.

Для приводу вентиляторних систем і компресорних станцій використовується комплекс асинхронних і синхронних двигунів. Схеми управління вентиляторами базуються на ступінчастому регулюванні швидкості за допомогою автотрансформаторів та перемикачів режимів (ручного чи автоматичного). У компресорних установках для запобігання перегріву використовується примусове водяне охолодження через циркуляційні рубарки і проміжні холодильники, захищені струменевими реле протоку води та електроконтактними манометрами.

Автоматизоване управління забезпечує почергове включення компресорів залежно від падіння тиску в ресиверах, контроль граничних параметрів, управління розвантажувальними вентилями під час пуску та захист обладнання. Впровадження комплексного автоматичного регулювання робочих режимів вентиляторних і компресорних установок дозволяє оптимізувати технологічні процеси та досягти економії електричної енергії на рівні 12–22%.

Ключові технічні ефекти від впровадження КРП:

– Збільшення коефіцієнта потужності ($\cos\varphi$): Підйом $\cos\varphi$ з базових 0.65…0.75 до нормативних або оптимальних 0.92…0.97.

– Зниження втрат активної електроенергії (ΔP): Втрати в кабелях та трансформаторах пропорційні квадрату струму (I^2R). Зменшення реактивного струму знижує загальні втрати на 10–30%.

$$\Delta P_{зменш}=\left(1-\left(\frac{\cos\varphi_1}{\cos\varphi_2}\right)^2\right)\cdot 100\%$$

– Зниження падіння напруги (ΔU): Підвищення та стабілізація рівня напруги на затискачах електроприймачів, що покращує пускові характеристики двигунів і продовжує термін їхньої служби.

– Розвантаження силових трансформаторів та кабельних ліній: Звільняється пропускна здатність мережі по повній потужності ($S=\sqrt{P^2+Q^2}$), що

дозволяє підключити додаткові потужності без заміни трансформаторів чи прокладання нових кабелів.

2. Економічне обґрунтування

Економічна вигода складається з двох частин: прямого економічного ефекту (зниження платежів за електроенергію) та непрямого ефекту (збереження ресурсу обладнання).

Структура економічного ефекту:

1. Відсутність/зменшення плати за перетік реактивної енергії: В Україні та багатьох інших країнах оператори систем розподілу (ОСР) застосовують підвищені тарифи або штрафні коефіцієнти за споживання реактивної енергії та за її зворотний перетік у мережу.

2. Зменшення загального обсягу споживання активної електроенергії: За рахунок зниження I^2R-втрат у внутрішньозаводських мережах.

3. Економія капітальних витрат (CAPEX) при розширенні виробництва: Відпадає потреба в купівлі додаткових трансформаторів ТМ/ТМГ чи збільшенні замовленої потужності.

Контакторні конденсаторні установки (класичні УКРМ / АКУ)

Це найбільш поширений і економічний тип пристроїв. В основі конструкції — ступеневі косинусні конденсатори, які підключаються або відключаються від мережі за допомогою спеціальних електромеханічних контакторів із придушенням пускових струмів під управлінням мікропроцесорного контролера.

- Принцип дії: Контролер вимірює поточний $\cos\varphi$ і, залежно від потреби, вмикає необхідну кількість ступенів конденсаторів.
- Швидкість реакції: Повільна — від 2 до 60 секунд (часовий інтервал потрібен для розряду конденсаторів перед повторним включенням).
- Сфера застосування: Підприємства зі спокійним, плавно змінюваним навантаженням (освітлення, асинхронні двигуни без частих пусків, компресори, насосні станції).

– Переваги: Найнижча питома вартість за 1 кВар потужності; проста та ремонтопридатна конструкція.

– Недоліки: Чутливість до вищих гармонік в мережі (ризик резонансу та виходу з ладу); обмежена кількість циклів комутації контакторів; непридатність для швидкозмінних навантажень.

2. Дросельовані (фільтрокомпенсуючі) установки (УКРМД)

Конструктивно схожі на класичні УКРМ, але послідовно з кожною конденсаторною секцією включено захисний антирезонансний дросель (розстроєний реактор).

Принцип дії: Дросель зміщує резонансну частоту кола «конденсатор–мережа» нижче частоти найнижчої вищої гармоніки (зазвичай нижче 5-ї або 7-ї гармоніки — 189 Гц або 135 Гц).

Швидкість реакції: Повільна — від 5 до 60 секунд.

Сфера застосування: Мережі з середнім та високим рівнем нелінійних спотворень (де коефіцієнт гармонік напруги THD_U>3…5%), де працюють частотні перетворювачі, випрямлячі, УПП, ДБЖ.

Переваги: Захист конденсаторів від перегріву, спучування та вибуху; усунення ризику виникнення паралельного резонансу на гармоніках; часткова фільтрація струмів вищих гармонік.

Недоліки: Вища ціна (орієнтовно на 40–70% дорожчі за стандартні УКРМ); більші габарити та маса; додаткове виділення тепла на дроселях, що вимагає примусового охолодження шафи.

3. Тиристорні швидкодіючі установки (УКРМТ / ТКРМ)

Замість електромеханічних контакторів для комутації конденсаторних батарей використовуються напівпровідникові тиристорні ключі.

Принцип дії: Увімкнення та вимкнення ступенів відбувається безмеханічно у момент переходу напруги через нуль («Zero-Crossing Switch»).

Швидкість реакції: Надшвидка — 10–20 мілісекунд (в межах одного періоду мережної напруги).

Сфера застосування: Об'єкти з різкозмінним та циклічним навантаженням (точкове та дугове зварювання, підйомні крани, роботизовані лінії, штамповочні преси).

Переваги: Миттєва реакція на стрибки навантаження; відсутність кидків струму та перенапруг при комутації; практично безмежний ресурс комутацій (відсутність зносу контактів).

Недоліки: Висока вартість; тиристори потребують масивних радіаторів та примусового охолодження; втрати потужності на самих тиристорах трохи вищі, ніж на контакторах.

4. Статичні генератори реактивної потужності (SVG / APF / STATCOM)

Це пристрої нового покоління, побудовані на базі силових транзисторів IGBT і цифрових signal-процесорів (DSP). Вони не містять масивних батарей конденсаторів.

Принцип дії: Пристрій генерує в мережу струм необхідної фази та амплітуди в реальному часі. SVG може генерувати як індуктивний, так і ємнісний струм, плавно і безступенево.

Швидкість реакції: Екстремально швидка — менше 5 мілісекунд.

Сфера застосування: Сучасні високотехнологічні виробництва, дата-центри, дугові сталеплавильні печі, об'єкти з глибокими просіданнями напруги, перекосом фаз та високим рівнем гармонік.

Переваги:

Повністю плавне (безступеневе) регулювання від -100% до +100%;

Працює однаково ефективно як на компенсацію індуктивного, так і ємнісного реактиву;

Здатність одночасно симетрувати фази та фільтрувати вищі гармоніки (до 13-ї або 25-ї);

Не чутливі до напруги мережі (на відміну від конденсаторів, вихідна потужність яких падає пропорційно квадрату напруги $Q \sim U^2$);

Компактні габарити (на 60–70% менші за традиційні УКРМ).

Недоліки: Найвища початкова вартість за 1 кВар потужності; вища складність обслуговування.

1.6.4 Обґрунтування інтеграції сучасних систем комерційного та технічного обліку (АСКОЕ)

Через багаторазове зростання вартості енергоресурсів їхня питома вага у собівартості товарної продукції промислових підприємств збільшилася до 22–38%, що вимагає якісно нового підходу до організації енергообліку. Управління енергоспоживанням базується на впровадженні автоматизованих систем контролю й обліку енергоресурсів (АСКОЕ), які поділяються на комерційні та технічні системи.

Комерційний облік є консервативним, забезпечує грошові розрахунки з енергопостачальною компанією, використовує сертифіковані прилади підвищеної точності з обов'язковим пломбуванням і виключає несанкціоноване втручання персоналу. Технічний облік охоплює внутрішні підрозділи для контролю втрат і аналізу ефективності. Впровадження АСКОЕ на підприємстві дозволяє виконувати цілодобовий збір даних, здійснювати самодіагностику, формувати баланси електроенергії по цехах, контролювати графіки навантажень у режимі реального часу та забезпечувати автоматизовану передачу звітів у зовнішні енергосистеми.

Інтеграція сучасних систем автоматизованого обліку електроенергії (ЛУОД, АСКОЕ/АСОЕЕ) є базовою передумовою для переходу до концепції Smart Grid, підвищення енергоефективності підприємств та мінімізації фінансових ризиків на ринку електроенергії.

Нижче наведено техніко-економічне та функціональне обґрунтування розділення та взаємоінтеграції двох систем обліку — комерційного (АСКОЕ) та технічного (АСТОЕ).

1. Функціональне розмежування систем

Для ефективного управління енергогосподарством необхідно чітко розмежовувати задачі комерційного та технічного обліку.

Ключові чинники та переваги інтеграції

Техніко-технологічний аспект

- Моніторинг показників якості електроенергії (ПЯЕ): Сучасні смарт-лічильники та аналізатори якості фіксують відхилення напруги, гармоніки, провали та стрибки, що дозволяє запобігти аваріям та передчасному зносу устаткування.
- Локалізація технологічних втрат: Зіставлення даних комерційного вводу та суми лічильників технічного обліку дозволяє виявити витоки, витоки струму на землю або некоректну роботу силових трансформаторів.
- Автоматизація збору даних: Виключення людського фактора при знятті показників, синхронізація часу всіх приладів вимірювання за протоколами NTP/GPS.

Економічний та управлінський аспект

- Точний розрахунок енергоємності продукції: Прив'язка споживання електроенергії до конкретних технологічних ліній чи змінових завдань для точного розрахунку собівартості.
- Управління піковими навантаженнями (Peak Shaving): Можливість оперативного регулювання споживання в часи максимальних тарифів для зменшення плати за потужність.
- Робота на ринку електроенергії: Перехід на погодинний/30-хвилинний графік дозволяє замовляти електроенергію на ринку «на добу наперед» (РДН) або внутрішньодобовому ринку (ВДР) із мінімальними небалансами.

3. Синергія та взаємодія систем

Інтеграція АСКОЕ та АСТОЕ в єдиний інформаційний простір підприємства (SCADA / MES / ERP) створює багаторівневу архітектуру:

Головний ефект інтеграції: Система АСКОЕ відповідає за фінансову точність у взаєморозрахунках із зовнішніми контрагентами, а система АСТОЕ дає інструменти для внутрішньої оптимізації та пошуку резервів енергозбереження.

4. Очікуваний економічний ефект

1. Зниження загального споживання: На 3–8% за рахунок виявлення нераціональних витрат та холостого ходу обладнання.

2. Зменшення штрафів за небаланси: До 10–15% за рахунок підвищення точності прогнозування графіків навантаження.

3. Скорочення витрат на обслуговування: Завдяки дистанційному діагностуванню та переходу до обслуговування за фактичним станом мережі.

4. Термін окупності проєкту (Payback Period): Залежно від масштабів об'єкта становить від 8 до 18 місяців.

2 ПЕРЕОСНОВЛЕННЯ ТА ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧИХ

2.1 Перерахунок та оптимізація параметрів замін малозавантажених асинхронних двигунів

Сумарні втрати активної потужності електродвигуна визначаються за розрахунковою формулою:

$$\Delta P_{cy,M}=\left[Q_{xx}\cdot\left(1-K_n^2\right)+K_n^2\cdot Q_h\right]\cdot K_{i.n}+\Delta P_{xx}+K_n^2\cdot\Delta P_{6.H.} \quad (2.1)$$

де $Q_{xx}=\sqrt{3}\cdot U_H\cdot I_{n.x.}$ — реактивна потужність, що споживається двигуном із мережі при номінальному навантаженні, квар;

U_H — номінальна напруга, В;

$I_{n.x.}$ — струм холостого ходу електродвигуна, А;

$K_H=\frac{P_{cp}}{P_H}$ — коефіцієнт завантаження електродвигуна;

P_{cp}, P_H — середнє навантаження та номінальна потужність електродвигуна, кВт;

$Q_H=\frac{P_H}{\eta_H}\cdot tg\varphi_H$ — реактивна потужність двигуна при номінальному навантаженні, квар;

η_H — ККД електродвигуна при номінальному навантаженні;

$tg\varphi_H$ — тангенс кута від номінального коефіцієнта потужності;

$K_{i.n.}$ — коефіцієнт втрат, $K_{i.n.}$=0,1 кВт/квар;

$\Delta P_{xx}=P_H\cdot\left(1-\eta_H\right)\cdot\gamma/\left[\eta_H\cdot(1+\gamma)\right]$ — втрати активної потужності при неробочому ході, кВт;

$\Delta P_{\bar{o}.H.}=P_H\cdot\left(1-\eta_H\right)/\left[\eta_H\cdot(1+\gamma)\right]$ — приріст втрат активної потужності в двигуні при 100% навантаженні, кВт;

$\gamma=\Delta P_{xx}/\left[\left(100-\eta_{H}\right)-\Delta P_{xx}\right]$ — розрахунковий конструктивний коефіцієнт.

Параметри базових двигунів (у кількості 129 штук) у цехах підприємства: P_H=33 кВт; U_H=380 В; η_H=0,88; $\cos\varphi$=0,91; I_{xx}=18,5 А; ΔP_{xx}=1,35 кВт. Звідси:

$$Q_{xx}=\sqrt{3}\cdot 380\cdot 18{,}5\cdot 10^{-3}=12{,}17 \text{ квар} \tag{2.2}$$

$$K_H=\frac{P_{ср}}{P_H}=\frac{16{,}5}{33}=0{,}5 \tag{2.3}$$

$$\Delta P_{\bar{с}.Н.}=33\cdot\frac{1\text{-}0{,}88}{0{,}88\cdot(1+0{,}14)}=3{,}48 \text{ кВт} \tag{2.4}$$

Для нового модернізованого двигуна параметри становлять: P_{H2}=19 кВт; U_H=380 В; η_{H2}=0,89; $\cos\varphi$=0,91; I_{xx2}=14,8 А; ΔP_{xx2}=0,99 кВт.

Сумарні втрати активної потужності старого малозавантаженого двигуна складають 5,42 кВт, а нового — 2,12 кВт. Ефективність заміни визначається зниженням втрат у кожному агрегаті:

$$\Delta P=\Delta P_{су,М}-\Delta P_{су,М2} \tag{2.5}$$

Заміна малозавантажених двигунів дозволяє забезпечити додаткову річну економію підприємства на рівні 0,38 млн кВт·год/рік.

2.2 Виключення проміжних передач зі структури електропривода

Зниження втрат від наявності проміжних механічних передач розраховується за формулою:

$$\Delta E = P \cdot k \cdot \left(\frac{1-\eta_{cy,1}}{\eta_{cy,1}} - \frac{1-\eta_{cy,2}}{\eta_{cy,2}} \right) \cdot T \cdot n \quad (2.6)$$

де $\eta_{cy,1}$ та $\eta_{cy,2}$ — сумарний ККД привода до і після виключення проміжних передач. Сумарний початковий ККД дорівнює $\eta_{cy,1}$=0,52, а після модернізації $\eta_{cy,2}$=0,78. Це дозволяє отримати суттєву економію енергії у виробничому циклі.

2.3 Модернізація та заміна застарілого вентиляторного обладнання

Економія електроенергії від заміни фізично зношених вентиляторів новими моделями з підвищеним ККД обчислюється виразом:

$$\Delta E = \frac{h \cdot Q \cdot (\eta_2 - \eta_1) \cdot t}{102 \cdot \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \cdot \eta_c} \quad (2.7)$$

де η_1 і η_2 — ККД старого і нового вентиляторів;

η_3,η_c — ККД електродвигуна і мережі; h — тиск (1200 Па);

Q — подача (2,8 м³/с);

t — час роботи (2600 год/рік).

Заміна вентилятора типу Ц4-70 на сучасний ВЦ14-46-8 забезпечує високу енергоефективність.

2.4 Впровадження автоматизованого управління вентиляторними комплексами

Інтеграція пристроїв автоматичного регулювання та управління вентиляторними установками залежно від параметрів навколишнього повітря дозволяє досягти економії електричної енергії на рівні 12–22%.

Річне споживання електроенергії вентиляторними агрегатами розраховується за формулою:

$$E=k_B \cdot P \cdot T \cdot n \quad (2.8)$$

де n — кількість вентиляторних установок (шт.);

P — номінальна потужність електродвигуна вентиляторної установки (кВт);

k_B — коефіцієнт використання;

T — річна тривалість роботи вентиляторної установки (год/рік).

Економія електричної енергії визначається за виразом:

$$\Delta E=E \cdot (k_{ea}-1) \quad (2.9)$$

де k_{ea} — коефіцієнт ефективності впровадження автоматичного управління (k_{ea}=1,12-1,22).

Зведені показники потенціалу енергозбереження за всіма запропонованими заходами на підприємстві наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 — Зведені можливості енергозбереження на підприємстві

№ з/п	Назва можливості з енергозбереження	Річна економія електричної енергії, тис. кВт·год
1	Заміна недовантажених асинхронних двигунів двигунами меншої потужності	585
2	Впровадження автоматичного керування вентиляторними установками	41,5
3	Заміна вентиляторів старих типів на нові	74,2
4	Виключення зі складу системи електроприводу проміжних передач	81,6
Всього	Загальний ефект від реалізації заходів	782,3

Загалом у результаті комплексної реалізації вищезгаданих заходів річна економія електричної енергії на підприємстві складе близько 782,3 тис. кВт·год.

2.6 Визначення параметрів і вибір засобів вимірювання енергоспоживання

Розрахунковий облік електричної енергії на підприємстві забезпечується за допомогою спеціалізованих лічильників, які встановлюються на межі балансової належності на панелі обліку комірки 35 кВ № 347 ПС-330/150/35 кВ. Для організації комерційного обліку застосовуються багатотарифні багатофункціональні лічильники електроенергії типу SL 7000 Smart (параметри: 110 В, 5 А, клас точності 0,5), які виробляються ДП «Актаріс Україна». Дані прилади забезпечують облік як активної, так і реактивної енергії в багатотарифному режимі та офіційно внесені до Державного реєстру вимірювальних засобів України.

Вторинні кола обліку (матеріал, переріз і довжина дротів і кабелів, підключення випробувальних блоків, захисних та комутаційних апаратів) виконані суворо відповідно до вимог Правил улаштування електроустановок (ПУЕ). Також обов'язково передбачено пломбування всіх елементів кіл розрахункового обліку.

Технічний облік електроенергії реалізується на базі аналогічних трифазних електронних багатотарифних і багатофункціональних лічильників SL 7000 Smart, що монтуються на панелі обліку комірки 35 кВ № 347 ПС-330/150/35 кВ, а також на приєднаннях 6 кВ понижувальної підстанції 35/6 кВ. Ці лічильники здатні інтегруватися в майбутньому в автоматизовану систему обліку, дозволяючи бачити повну картину розподілу енергії з урахуванням власних потреб самої підстанції.

Характеристики та можливості лічильників SL 7000 Smart:

- Прилади призначені для обліку активної та реактивної енергії у трифазних мережах змінного струму при трансформаторному включенні, підтримуючи одно- і багатотарифні режими з можливістю налаштування до 16 тарифних зон.
- Лічильник працює в широкому діапазоні робочих напруг і струмів, володіє високою чутливістю та виводить на РК-дисплей параметри мережі (струми, напруги, активну, реактивну і повну потужність).
- Обмін інформацією та робота в системі АСКОЕ забезпечуються за допомогою імпульсних входів/виходів, цифрових інтерфейсів та вбудованого GSM-модему.
- Додаткові інтерфейси підключаються без необхідності відключення лічильника та порушення метрологічних пломб.
- В енергонезалежній пам'яті приладу зберігаються графіки навантаження по 16 каналах із можливістю зберігання даних до 900 днів.
- Захист інформації та параметрів забезпечується трирівневою системою спеціальних паролів доступу.

Технічні характеристики лічильника SL 7000 Smart наведено в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 — Технічні характеристики лічильника SL 7000 Smart

Найменування характеристики	Значення	Примітка
Клас точності	0,5S; 1,0	Залежно від виконання
Номінальні напруги, В	57/100, 220/380 та 63/110, 230/400	Залежно від модифікації
Номінальна частота мережі, Гц	50 (±5%)	60 (±5%) — на замовлення
Номінальні (максимальні) струми, А	1(2), 1(6), 1(10), 2(6)	Залежно від модифікації
Поріг чутливості (% від номінальної Р)	0,1 — 0,4	Залежно від модифікації

Лічильник SL 7000 Smart виконує вимірювання та фіксує в пам'яті значення енергії за чітко встановленим інтервалом часу, що дозволяє після зчитування інформації побудувати графіки споживання й генерації активної та реактивної енергії. Прилад формує сигнал про перевищення заданого порогового значення потужності, який використовується як попередження або для автоматичного відключення (та подальшого включення при зниженні навантаження), що дозволяє уникнути штрафних санкцій. Програмування лічильника та зчитування даних здійснюється за допомогою спеціального програмного забезпечення російською мовою лише за наявності спеціальних паролів трьох рівнів доступу, найнижчий з яких дозволяє виключно зчитування інформації.

Конструктивно вимірювальна система лічильника складається з датчиків струму і напруги, спеціалізованого мікропроцесора для цифрової обробки сигналів із високою точністю, а також додаткових електронних плат. Мікропроцесор отримує сигнали через високолінійні трансформатори струму і резистивні подільники, а аналого-цифрові перетворювачі виділяють дискретні

значення сигналів для подальшої обробки мікроконтролером, який керує дисплеєм та інтерфейсами зв'язку.

Окрім цього, прилади SL 7000 Smart мають такі запрограмовані автоматичні функції:

- Фіксація максимальних показників потужності при зміні сезонів.
- Авточитання (самосчітування) даних у визначений день місяця або через заданий інтервал днів.
- Здійснення автоматичного виклику на ЕОМ верхнього рівня при зникненні та відновленні електроживлення.
- Автоматичний перехід на літній і зимовий час.
- Виведення на рідкокристалічний індикатор попереджень про перевищення встановленого ліміту потужності.
- Реалізація функції «управління навантаженням» через спрацювання електронного реле при переході через межі тарифних зон або перевищенні потужності.
- Виконання тестів якості електроенергії за завантаженими пороговими значеннями.
- Проведення діагностичних тестів параметрів напруги та струму о 00:00 годині та під час подачі живлення.

У пам'яті приладу ведеться облік кількох спеціалізованих журналів:

- Журнал відключення живлення: фіксує загальну кількість вимкнень, сумарний час перерв, дату й час останнього зникнення та відновлення живлення.
- Журнал зв'язку: накопичує інформацію про загальну кількість сеансів зв'язку з лічильником, час і дати процедур програмування чи модифікації програмного забезпечення.
- Журнал подій: фіксує моменти виходу контрольованих параметрів за встановлені пороги із зазначенням початку та закінчення таких подій.
- Журнал таймерів ПКЗ: реєструє сумарну тривалість та кількість відхилень за кожним окремим параметром.

3 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ТА ФІНАНСОВИЙ АНАЛІЗ РЕАЛІЗАЦІЇ ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧИХ ЗАХОДІВ

3.1 Розрахунок економічного ефекту від впровадження енергозберігаючих ініціатив

3.1.1 Оцінка економічної ефективності заміні асинхронних двигунів агрегатами меншої потужності

Ефективність заміни малозавантажених електродвигунів визначається загальним зниженням втрат активної потужності в кожному агрегаті, яке становить ΔР=3,42 кВт.

Економія грошових коштів підприємства в результаті реалізації цього організаційно-технічного заходу розраховується за виразом:

$$E=73\cdot\Delta P\cdot t_{роб}\cdot\beta \qquad (3.1)$$

$$E=73\cdot3,42\cdot5200\cdot1,15=1482350 \text{ грн/рік}$$

Капітальні інвестиції на закупівлю і встановлення нового обладнання складають 535 тис. грн (придбання 73 двигунів за ціною 7328 грн за кожен).

Простий термін окупності капітальних вкладень визначається як відношення капітальних витрат до річної економії:

$$T=\frac{K}{E} \qquad (3.2)$$

$$T=\frac{535}{1482,35}=0,36 \text{ року}$$

3.1.2 Виключення проміжних передач зі структури електропривода

Як було визначено у попередніх розділах, виключення зайвих проміжних передач із кінематичної схеми електропривода забезпечує річну економію електроенергії на рівні ΔE=81,62 тис. кВт·год/рік, а вартість цієї економії при чинному тарифі на електроенергію становить B=78450 грн/рік.

Початкові капітальні витрати на виконання цього заходу складають K=10300 грн для кожного з 2-х привідних механізмів (загалом 20600 грн).

Простий строк окупності розраховується за формулою:

$$T_{ок}^{пр}=\frac{K}{B} \tag{3.3}$$

$$T_{ок}^{пр}=\frac{20600}{78450}=0,26 \text{ року}$$

3.1.3 Заміна застарілих вентиляторів на сучасні високоефективні аналоги

Річна економія електричної енергії від заміни фізично зношених вентиляторів складає ΔE=58400 кВт·год. Відповідно, щорічне зменшення грошових витрат на оплату електроенергії визначається за виразом:

$$B=\Delta E\cdot\rho \tag{3.4}$$

$$B=58400\cdot0,755=44092 \text{ грн/рік}$$

Капітальні витрати на заміну одного вентилятора включають вартість самого обладнання (25300 грн) та монтажні роботи (3960 грн), що в сумі для 2 одиниць становить K=58520 грн.

Простий строк окупності становить:

$$T_{ок}^{пр}=\frac{58520}{44092}=1{,}33 \text{ року}$$

3.1.4 Впровадження автоматизованого управління вентиляторними комплексами

Економія енергії від впровадження автоматики становить 12–22%. Річне споживання електроенергії вентиляторними установками дорівнює 132000 кВт·год/рік.

Щорічне зменшення витрат на оплату енергоносіїв обчислюється як:

$$B=\Delta E\cdot\rho \qquad (3.5)$$

$$B=39600\cdot 0{,}92=36432 \text{ грн/рік}$$

Капітальні інвестиції на придбання та монтаж 2 пристроїв автоматики складають 19800 грн. Простий строк окупності дорівнює:

$$T_{ок}^{пр}=\frac{19800}{36432}=0{,}54 \text{ року}$$

3.2 Фінансовий аналіз ефективності інвестиційного проекту та кошторис впровадження

Кошторис на впровадження основного енергозберігаючого заходу (заміни вентиляторів на сучасні аналоги типу ВЦ14-46-8) наведено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 — Кошторис на впровадження заходу з енергозбереження

№ з/п	Найменування обладнання, робіт	Кількість, шт.	Загальна вартість робіт, грн
1	Вентилятор ВЦ14-46-8	2	86000
2	Витрати на проєктування	—	6564,03
3	Монтажні роботи	—	11370,15
4	Транспортні витрати	—	1100
5	Всього	—	105034,18

Ціни та фінансові ресурси в розрахунках адаптовані відповідно до ринкових умов періоду реалізації проекту. Економія річних витрат внаслідок скорочення споживання електроенергії на 58,4 тис. кВт·год/рік становить:

$$E=\Delta W\cdot\rho \tag{3.9}$$

$$E=58400\cdot0,755=44092 \text{ грн/рік}$$

Простий термін окупності капітальних вкладень складає:

$$T_{ок}^{пр}=\frac{\text{Витрати}}{E}=\frac{105034,18}{44092}=2,38 \text{ роки}$$

3.3 Джерела фінансування проекту та аналіз грошових потоків

Основними джерелами фінансування інвестиційного проекту є банківський кредит на придбання обладнання та власні кошти підприємства на транспортні й пусконалагоджувальні роботи. Для оцінки комерційної привабливості розглядаються пропозиції провідних банків України (ставка рефінансування та кредитування коливається в межах 18–20% річних).

У таблиці 3.2 наведено розрахунок грошового потоку та чистого приведеного прибутку (NPV) при залученні кредитного фінансування під 18% річних (Укрсоцбанк).

Таблиця 3.2 — Фінансовий аналіз проекту при ставці дисконту 18%

Рік	Інвестиційні витрати, грн/рік	Експлуатаційні витрати, грн/рік	Річна економія, грн/рік	Грошовий потік, грн/рік	Кумулятивний чистий грошовий потік, грн/рік
0	105034,18	0	0	-105034,18	-105034,18
1	550	0	44092	61958	-43076,18
2	550	0	44092	61958	18881,82
3	550	0	44092	61958	80839,82
4	550	0	44092	61958	142797,82
5	550	0	44092	61958	204755,82
Чистий приведений прибуток	—	—	—	—	—

Аналогічні розрахунки для інших банківських установ зведено в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 — Фінансовий аналіз проекту при різній ставці дисконту

Джерело фінансування / Банк	Процентна ставка, %	Чистий приведений прибуток (NPV), грн
Укрсоцбанк	18	88724,02
Райффайзен Банк Аваль	19	84271,5
АТ ВаБанк	20	79976,9
Потенціал інвестицій (для розрахунку IRR)	50	-420,4

Загальні економічні показники інвестиційних проектів за всіма запланованими заходами з енергозбереження зведено до таблиці 3.4.

На графіку рисунка 3.1 відображено зміну кумулятивного дисконтованого грошового потоку залежно від горизонту планування (у роках) для трьох різних ставок дисконтування (k=18%, k=19%, k=20%). Лінії практично збігаються, демонструючи стійкість проєкту до коливань вартості залученого капіталу.

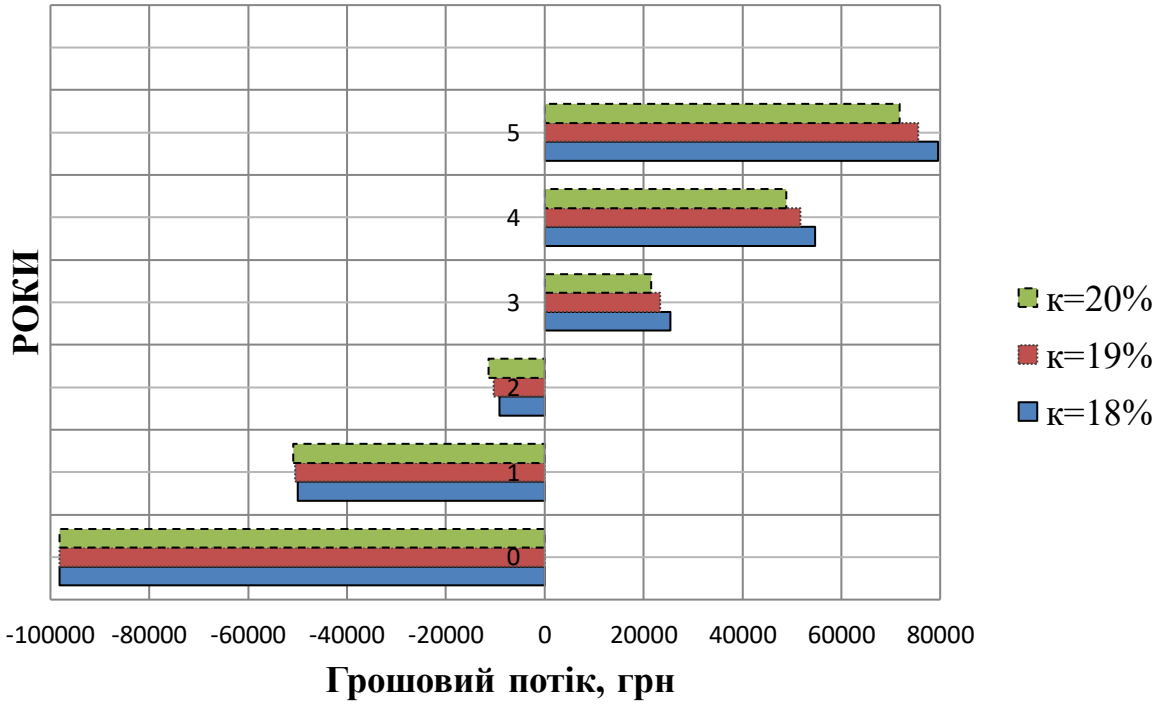


Рисунок 3.1 – Дисконтований строк окупності

Для визначення внутрішньої норми рентабельності (IRR) проєкту використовують значення позитивного та негативного чистого приведеного прибутку (NPV) при відповідних ставках дисконту, на основі яких будується графічна залежність на рисунку 3.2.

– При підвищенні ставки дисконту до 50% чистий приведений прибуток стає від'ємним і складає -369,9 грн.

– Зміна дисконтної ставки становить: Δi=50%-18%=32%.

– Пропорційний розрахунок дозволяє встановити, що внутрішня норма рентабельності досягає значень, за яких проєкт залишається високоефективним за умови збереження норми дисконтування нижче 33%.

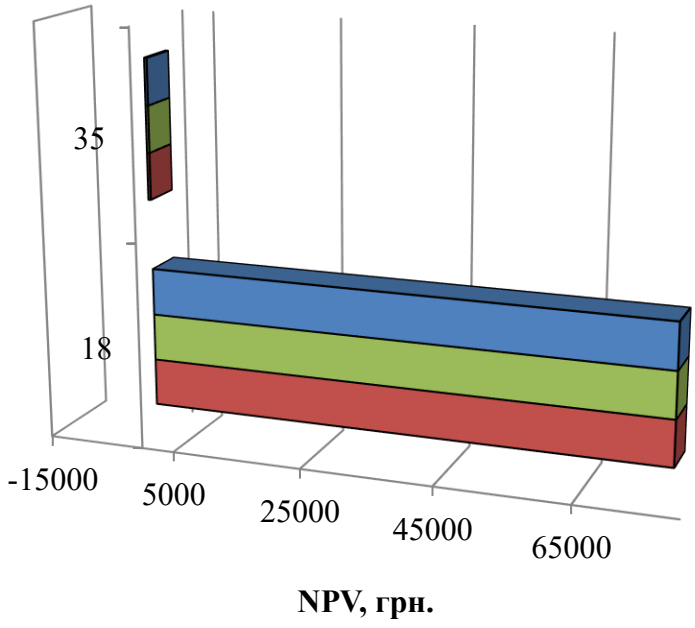


Рисунок 3.2 – Внутрішня норма рентабельності (IRR)

Графік на рисунку 3.2 ілюструє точку перетину лінії чистим приведеним прибуток (NPV) з віссю абсцис (ставкою дисконту, %). Значення плавно знижується від початкових 77953,3 грн (при ставці 18%) до нульової рентабельності та від'ємного значення -369,9 грн (при ставці 50%), що дозволяє графічно точно визначити запас фінансової міцності інвестиційного проекту.

Наведена процедура дозволяє розрахувати базові економічні показники інвестиційних проєктів для всіх запланованих кроків із енергозбереження та узагальнити їх у таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Показники ефективності інвестицій у заходи

Захід з енергозбереження	Капітальні вкладення, тис. грн	Річна економія електричної енергії, тис. кВт·год	Річна економія коштів, тис. грн	Строк окупності, роки
Заміна недовантажених асинхронних двигунів двигунами меншої потужності	535	585	964,2	0,55
Впровадження автоматичного керування вентиляторними установками	19,8	41,5	63,8	0,31
Заміна вентиляторних установок старих типів на нові	105	74,2	115,5	0,91
Виключення зі складу системи електроприводу проміжних передач	20,6	81,6	128,1	0,16
Всього	680,4	782,3	1271,6	—

Після наведеної таблиці у проєкті зазначається, що були визначені загальні техніко-економічні показники запропонованих енергозберігаючих заходів. Загальне зменшення споживання електричної енергії від реалізації всіх перелічених заходів складе близько 782,3 тис. кВт·год на рік. При загальних

капітальних вкладеннях на рівні близько 680,4 тис. грн, термін їх окупності коливається від 0,16 до 0,91 року, що є безперечно ефективним з економічної точки зору.

ВИСНОВКИ

На основі детальних технічних розрахунків, моделювання режимів електроспоживання та фінансового аналізу інвестиційних проєктів для ППідприємствоможна сформулювати такі ключові висновки:

1. Аналіз поточного стану енергогосподарства підприємства показав наявність значного резерву для економії енергоресурсів, особливо в секторах електродвигунного навантаження, вентиляційних систем та внутрішньозаводського транспорту потужності.

2. Комплексна реалізація розроблених заходів — зокрема заміна малозавантажених двигунів, оптимізація привідних механізмів, оновлення вентиляторного обладнання на сучасні моделі типу ВЦ14-46-8 та автоматизація процесів — забезпечує сумарне скорочення річного споживання електроенергії на 782,3 тис. кВт·год.

3. Загальний економічний ефект від зниження енергоспоживання досягає 1271,6 тис. грн на рік при загальних капітальних вкладеннях на рівні 680,4 тис. грн.

4. Розрахунки простих і дисконтованих термінів окупності (які становлять від 0,16 до 0,91 року для окремих заходів та близько 2 років і 3 місяців для масштабних інвестицій при залученні банківських кредитів під 18–20% річних) підтверджують високу комерційну привабливість, фінансову стійкість і рентабельність запропонованих проєктних рішень.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Енергоефективність в промислових електроустановках / за ред. В. В. Коваленка. Київ: Видавництво «Техніка», 2021. 312 с.

2. Проєктування та експлуатація систем електропостачання промислових підприємств / М. М. Шут, О. І. Петров, Л. В. Сидоренко. Харків: НТУ «ХПІ», 2020. 280 с.

3. Енергозбереження та енергоменеджмент: підручник / Б. С. Кіндрацький, Р. М. Дубиняк. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2019. 340 с.

4. Електричні машини та апарати: навч. посібник / А. П. Чорний, В. М. Світлий. Дніпро: НТУ «ДП», 2022. 295 с.

5. Автоматизовані системи керування технологічними процесами в енергетиці / В. І. Гажаман, С. М. Шевченко. Київ: Вища школа, 2021. 264 с.

6. Перехід на енергоефективні асинхронні двигуни в промисловому електроприводі / П. М. Василенко, О. В. Грищенко // Технічна електродинаміка. 2022. № 4. С. 45–52.

7. Компенсація реактивної потужності в електричних мережах підприємств / І. М. Кузнєцов, Д. В. Романюк // Енергетика: економіка, технології, екологія. 2023. № 1. С. 60–68.

8. Методи та засоби обліку електричної енергії в сучасних АСКОЕ / В. О. Мельник, Т. П. Коваль. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 198 с.

9. Охорона праці в галузі електроенергетики: навч. посібник / За ред. В. В. Сафонова. Київ: Основа, 2018. 336 с.

10. Промислова електроенергетика та енергозбереження / С. О. Во Войтенко, М. Г. Задорожний. Одеса: ОНПУ, 2021. 245 с.

11. Оптимізація режимів роботи насосних та вентиляторних установок / Л. В. Дементий, І. В. Павленко. Краматорск: ДДМА, 2019. 210 с.

12. Електричні мережі та системи: підручник / В. П. Розен, О. Б. Жаркін. Київ: Центр учбової літератури, 2020. 404 с.

13. Автоматизація електроприводів і промислових установок / Ю. М. Зарудний, В. А. Марченко. Харків: Видавництво «Форт», 2022. 315 с.

14. Використання мікропроцесорних засобів вимірювальної техніки в системах контролю енергоспоживання / О. П. Шевчук // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Серія: Електроенергетика. 2021. Вип. 2. С. 112–118.

15. Економіка енергетики: навч. посібник / Н. М. Бєляєва, В. Г. Швець. Суми: ВТД «Університетська книга», 2020. 270 с.

16. Аналіз надійності та ефективності систем електропостачання промислових підприємств / Р. В. Ковальчук, О. М. Дмитренко // Технімашинобудування. 2023. Вип. 1. С. 84–90.

17. Енергетичний менеджмент промислових підприємств / І. М. Паламарчук. Житомир: ЖДТУ, 2019. 224 с.

18. Промислові вентиляторні та компресорні установки: довідник / В. К. Смирнов, Т. М. Григор'єв. Київ: Техніка, 2018. 288 с.

19. Методичні вказівки до виконання дипломних проєктів для студентів енергетичних спеціальностей / Уклад. В. В. Коваленко, І. М. Назаренко. Запоріжжя: НУ «ЗП», 2023. 84 с.

20. Цифрові технології в комерційному обліку електричної енергії / М. Д. Петренко, С. І. Бондар // Електротехніка та електроенергетика. 2022. № 3. С. 33–40.

21. Надійність та ефективність електричних апаратів і систем / Д. О. Бойко. Київ: Видавничий дім «Слово», 2021. 350 с.

22. Екологічні аспекти енергозбереження в промисловості / Г. В. Павлова. Харків: ХНАДУ, 2020. 180 с.

23. Дослідження втрат потужності в асинхронних двигунах при змінних навантаженнях / О. В. Левченко, М. П. Сидоренко // Наукові вісці НТУУ «КПІ». 2022. № 2. С. 71–78.

24. Інформаційні технології в енергетиці та системах АСКОЕ / В. М. Грищенко. Вінниця: ВНТУ, 2021. 230 с.

25. Техніко-економічне обґрунтування інвестиційних проєктів в енергетиці / С. І. Васильєв, Л. М. Кравченко. Київ: Алерта, 2023. 256 с.