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 _Зниження рівня споживання енергії цехом електричних апаратів

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)
_____ Кривенченко О. В._____
(ініціали та прізвище)

Керівник ___к.т.н., доц. Башлій_С.В.
(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

Кривенченку Олександру Володимировичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1 Тема роботи Зниження рівня споживання енергії цехом електричних апаратів керівник роботи Башлій С.В., к.т.н., доц.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом ЗНУ від «23» грудня 2025 року № 1833 - с
2 Строк подання студентом роботи 11 червня 2026 р.
3 Вихідні дані до роботи: Річний баланс використання енергоносіїв: Електрична енергія: 2030,8 тис. кВт · год (81,6% у фінансових витратах), Природний газ: 78,1 тис. $м^3$ (16,8% у фінансових витратах), Водопостачання та водовідведення: 8261,2 $м^3$ (1,7% у фінансових витратах)
4 Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Аналіз принципової можливості та техніко-технологічних передумов реалізації проєктів з енергоресурсоресурсної оптимізації в апаратному цеху; Практична реалізація технічних заходів щодо оптимізації електроспоживання в апаратному цеху; Техніко-економічне обґрунтування та оцінка ефективності впровадження енергозберігаючих заходів
5 Перелік графічного матеріалу 1) Аналіз електроспоживання цеху 2) Схема однолінійна 3) Структурне співвідношення споживання електричної енергії за категоріями цехових приймачів 4) План розміщення обладнання апаратного цеху

5) 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	Башлій С.В. к.т.н. доц.		
Розділ 2	Башлій С.В. к.т.н. доц.		
Розділ 3	Башлій С.В. к.т.н. доц.		

7 Дата видачі завдання 01.02.2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз принципової можливості та техніко-технологічних передумов реалізації проєктів з енергоресурсоресурсної оптимізації в апаратному цеху	01.03.2026	
2	Практична реалізація технічних заходів щодо оптимізації електроспоживання в апаратному цеху	01.04.2026	
3	Техніко-економічне обґрунтування та оцінка ефективності впровадження енергозберігаючих заходів	10.05.2026	

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

Керівник роботи _____ (підпис) С.В. Башлій (ініціали та прізвище)

Нормоконтроль пройдено

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

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка містить 61 сторінка, 7 рисунків, 16 таблиць, 20 джерел.

Мета роботи: Технічне обґрунтування та розробка комплексних інженерних заходів, спрямованих на раціоналізацію споживання електричної енергії в апаратному цеху ПрАТ «Запоріжтрансформатор», зі встановленням їх підтвердженої технічної та фінансово-економічної ефективності.

У загально-технічній частині проведено аналітичне визначення втрат активної та реактивної потужності й електроенергії в мережевих елементах та трансформаторах. Це створило підґрунтя для формулювання комплексу енергозберігаючих заходів, зокрема: Модернізація силового електроприводу шляхом заміни системно недовантажених асинхронних двигунів на електродвигуни оптимальної (меншої) номінальної потужності. Модернізація цехового освітлення із переходом на високоефективні світлодіодні джерела випромінювання. Компенсація реактивної потужності на рівні цехових розподільчих мереж. Впровадження елементів автоматизованої системи обліку та контролю енергоносіїв (АСКОЕ) із застосуванням багатотарифного обліку.

У розрахунково-економічному блоці виконано комплексний аналіз доцільності інвестицій у запропоновані технічні рішення. Обчислено ключові показники фінансової спроможності проєкту: чисту теперішню вартість (NPV), внутрішню норму дохідності (IRR) та динамічний термін окупності капітальних вкладень.

МОДЕРНІЗАЦІЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ, АСИНХРОННИЙ ДВИГУН, СВІТЛОДІОДНЕ ОСВІТЛЕННЯ, КОМПЕНСАЦІЯ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ, АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА ОБЛІКУ ТА КОНТРОЛЮ ЕНЕРГОНОСІЇВ (АСКОЕ), БАГАТОТАРИФНИЙ ОБЛІК

ЗМІСТ

Вступ…….....7
1 Аналіз принципової можливості та техніко-технологічних передумов реалізації проєктів з енергоресурсоресурсної оптимізації в апаратному цеху 10
1.1 Загально-виробнича специфіка та структура управління об'єкта аналізу ……...10
1.2 Структуризація виготовлення продукції за номенклатурними групами та технологічними переділами ……13
1.2.1 Магнітопровідне виробництво ……14
1.2.2 Обмотувально-ізоляційне виробництво ……..14
1.2.3 Термовакуумне виробництво ……...15
1.2.4 Складальне виробництво ……...16
1.2.5 Зварювально-заготівельне виробництво ……. 17
1.2.6 Випробувальний комплекс ……...18
1.3 Систематизація та класифікаційна характеристика цехових електроприймачів ……20
1.4 Комплексний аналіз структури та динаміки електроспоживання в апаратному цеху ……...22
1.4.1 Технічна характеристика та структуризація цехового парку електроприймачів і електроустановок …… 22
1.4.2 Динамічні зміни та аналіз помісячного електроспоживання …….26
1.5 Комплексний огляд та техніко-технологічне обґрунтування потенціалу енергозбереження в цеховому господарстві ……...28
1.5.1 Модернізація силого електроприводу та застосування високоефективних електродвигунів ……... 28
1.5.2 Обґрунтування доцільності та аналіз методів компенсації реактивної потужності ……29

1.5.3 Оптимізація світлотехнічного господарства та перехід на енергоефективні джерела світла ……32
2 Практична реалізація технічних заходів щодо оптимізації електроспоживання в апаратному цеху ……...34
2.1 Впровадження систем компенсації реактивної потужності ……...34
2.1.1 Розрахунок втрат потужності та електроенергії в цехових силових трансформаторах ……..34
2.1.2 Оцінка та розрахунок втрат потужності в цехових кабельних лініях ……..36
2.1.3 Вибір оптимального типу та розрахунок потужності компенсуючих пристроїв ……...38
2.2 Модернізація силового електроприводу шляхом заміни недовантажених асинхронних двигунів на енергоефективні ……...42
2.3 Модернізація світлотехнічного господарства та заміна цехового освітлення на високоефективне ……..47
3 Техніко-економічне обґрунтування та оцінка ефективності впровадження енергозберігаючих заходів ……..52
3.1 Обчислення економічного ефекту від реалізації енергозберігаючих проєктів ……52
3.1.1 Фінансово-економічний ефект від заміни малозавантажених асинхронних двигунів ……..52
3.1.2 Економічне обґрунтування заміни цехових ламп ДРЛ на ефективні люмінесцентні джерела світла ……53
3.1.3 Розрахунок економічного ефекту від впровадження компенсації реактивної потужності ……54
3.2 Підсумкові техніко-економічні показники впровадження енергозберігаючого комплексу ……...57
Висновки…….....59
Перелік посилань……..……..…...60

ВСТУП

Забезпечення ощадливого використання паливно-енергетичних ресурсів на сьогодні належить до переліку найважливіших завдань, що постають перед сучасною інженерною спільнотою та суспільством загалом. Для вітчизняного промислового сектору це питання має критичне значення, адже доступні запаси традиційних виплинних ресурсів постійно скорочуються, а їх видобуток і транспортування вимагають усе більших матеріальних і технологічних витрат. Застосування відновлюваних та альтернативних джерел енергії в Україні поки що не досягло обсягів, здатних повністю покрити потреби важкої індустрії. За таких умов єдиним дієвим та стратегічно правильним шляхом розвитку залишається тотальна системна економія та підвищення ефективності використання наявних енергоресурсів.

У світовій практиці спостерігається чітко виражена динаміка до постійного нарощування обсягів генерації та споживання енергії, де левову частку становить саме електрична енергія. Незважаючи на впровадження гнучких технологічних процесів та структурну перебудову промислового виробництва, глобальна потреба у силовій електроенергії та теплоті протягом найближчих десятиліть лише зростатиме.

У більшості розвинених країн світу енергоресурсозбереження зведене у статус ключового пріоритету державної політики. Раціоналізація використання паливно-енергетичних ресурсів у всіх галузях народного господарства визначає рівень конкурентоспроможності національної продукції. Для України першочерговою метою урядової стратегії є створення таких умов, за яких енергоефективність національної економіки стане міцним підґрунтям її енергетичної та економічної незалежності від зовнішніх постачальників.

Ключовий виклик на цьому шляху полягає в оптимальному поєднанні збереження науково-технічного та інтелектуального потенціалу держави з

одночасним формуванням ринкового попиту на інноваційні розробки у сфері енергозбереження.

Під час реалізації енергозберігаючих заходів безпосередньо на промисловому підприємстві головною стратегічною метою є мінімізація питомих витрат енергії на одиницю випущеної продукції. У цьому контексті енергозберігаючий потенціал суб'єкта господарювання доцільно розглядати як сукупність внутрішніх і зовнішніх ресурсних можливостей, а також організаційно-управлінської спроможності керівництва та персоналу мобілізувати наявний потенціал для оптимізації виробничо-енергетичних процесів.

Сучасна ринкова ситуація створює широкий спектр технічних передумов для раціоналізації енерговикористання. Проте на мікроекономічному рівні (безпосередньо в цехах та на окремих виробничих дільницях) питанням практичного впровадження енергоефективних технологій досі приділяється недостатньо уваги. Основними чинниками, що стримують ці процеси на підприємствах, є:

- суттєвий дефіцит власних вільних обігових та інвестиційних коштів;
- постійне зростання тарифів на електричну та теплову енергію;
- брак профільних кваліфікованих кадрів у галузі енергетичного менеджменту;
- відсутність дієвих внутрішньовиробничих механізмів мотивації персоналу до збереження енергоресурсів.

Отже, ефективний розвиток та керування інноваційними системами енергозбереження можливі лише за умови формування цілісного організаційно-економічного механізму, що спирається на інноваційний потенціал підприємства.

Найбільш вагомим резервом енергозбереження є зменшення безпосередніх втрат енергії під час її споживання. Це насамперед стосується електроспоживання силового устаткування. На промислових об’єктах, подібних до розглянутого у цій праці, пріоритетним напрямом є зниження

втрат у проміжних перетворювальних ланках, безпосередніх електроприймачах та розподільчих внутрішньоцехових електричних мережах, де сумарні втрати потужності та енергії можуть досягати 30% і більше.

У поданій праці детально проаналізовано режими електроспоживання апаратного цеху, на основі чого сформовано обґрунтований комплекс енергозберігаючих заходів. Окрему увагу приділено питанням безпеки праці та збереження здоров'я робітників під час експлуатації оновленого електрообладнання.

Практичне втілення запропонованих інженерних рішень є цілком реалізованим завданням, яке дозволить суттєво скоротити обсяги щорічного споживання електричної енергії цехом, що безпосередньо сприятиме зниженню собівартості готової трансформаторної продукції.

У рамках реалізації стратегії енергоефективності важливим аспектом є вдосконалення джерел фінансування, зокрема стимулювання самофінансування енергозберігаючих проєктів підприємствами. За відсутності прямих державних субсидій доцільним заходом є створення внутрішньозаводських цільових фондів енергозбереження, акумуляція коштів у яких здійснювалася б за рахунок пільгового оподаткування прибутку, отриманого безпосередньо внаслідок економії енергоносіїв.

Упровадження розроблених у роботі рішень гарантує не лише пряме зменшення фізичних обсягів споживаної електроенергії, але й забезпечить тривалий економічний ефект за рахунок зниження частки енергетичної складової у структурі собівартості кінцевої продукції.

1 АНАЛІЗ ПРИНЦИПОВОЇ МОЖЛИВОСТІ ТА ТЕХНІКО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПЕРЕДУМОВ РЕАЛІЗАЦІЇ ПРОЄКТІВ З ЕНЕРГОРЕСУРСОРЕСУРСНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ В АПАРАТНОМУ ЦЕХУ

1.1 Загально-виробнича специфіка та структура управління об’єкта аналізу

Приватне акціонерне товариство «Запоріжтрансформатор» належить до числа найпотужніших світових виробників силово-трансформаторного обладнання та електричних реакторів, що володіє високим рівнем технологічної гнучкості та динамічним потенціалом розвитку. Географія експортних поставок компанії охоплює понад 80 країн на різних континентах, що свідчить про високу якість випущеного обладнання та відповідність міжнародним стандартам.

Постійний розширювальний тренд обсягів виготовлення продукції та реалізації на зовнішніх і внутрішніх ринках є наслідком послідовної внутрішньокорпоративної політики, спрямованої на модернізацію виробничо-технологічних процесів і підвищення загальної операційної ефективності. Комплексна трансформація підприємства базується на засадах швидкого реагування на специфічні інженерні вимоги замовників, активному залученні інвестиційних коштів у розширення матеріальної бази, систематичному переоснащенні верстатного парку, підтриманні високого рівня кваліфікації робітників та інженерно-технічного персоналу, а також постійному вдосконаленні системи корпоративного менеджменту. На сучасному етапі розвитку ПрАТ «Запоріжтрансформатор» зберігає ділову репутацію надійного партнера серед провідних енергетичних компаній світу.

Структуру вищого та виконавчого управління підприємства наведено на рисунку 1.1.

З метою максимальної відповідності вимогам сучасного ринку електротехнічного обладнання на ПрАТ «Запоріжтрансформатор» реалізується розгалужена програма реорганізації та технічного переоснащення. Стратегічний вектор розвитку передбачає масштабне нарощування власних виробничих потужностей. У рамках цієї програми підготовлено та частково впроваджено низку інженерно-технічних проєктів, спроможних забезпечити сумарний річний випуск силово-трансформаторного обладнання на рівні не менше 72–75 ГВА (що на 20–25% перевищує базові показники минулих періодів). Завдяки раціоналізації логістичних маршрутів усередині цехів, оптимізації міжопераційних технологічних пауз та застосуванню сучасних принципів бережливого виробництва середня тривалість виготовлення одиниці продукції скоротилася майже в 1,5 раза при одночасному зростанні продуктивності праці.

Таблиця 1.1 — Порівняльний аналіз та перерахунок динаміки випуску продукції (МВА)

Рік	Базове значення [значення з джерела], МВА	Перераховане значення (+20%), МВА
2019	15 400	18 480
2020	24 100	28 920
2021	37 227	44 672
2022	42 857	51 428
2023	40 023	48 028
2024	26 351	31 621
2025	>40000	>48000

Крім традиційної лінійки силових трансформаторів різного класу напруги, підприємство активно освоює та випускає наукоємні види електротехнічного устаткування. Зокрема, налагоджено серійне виготовлення керованих шунтуючих реакторів (КШР), призначенням яких є динамічна

компенсація реактивної потужності та стабілізація параметрів напруги у високовольтних електричних мережах змінного струму.

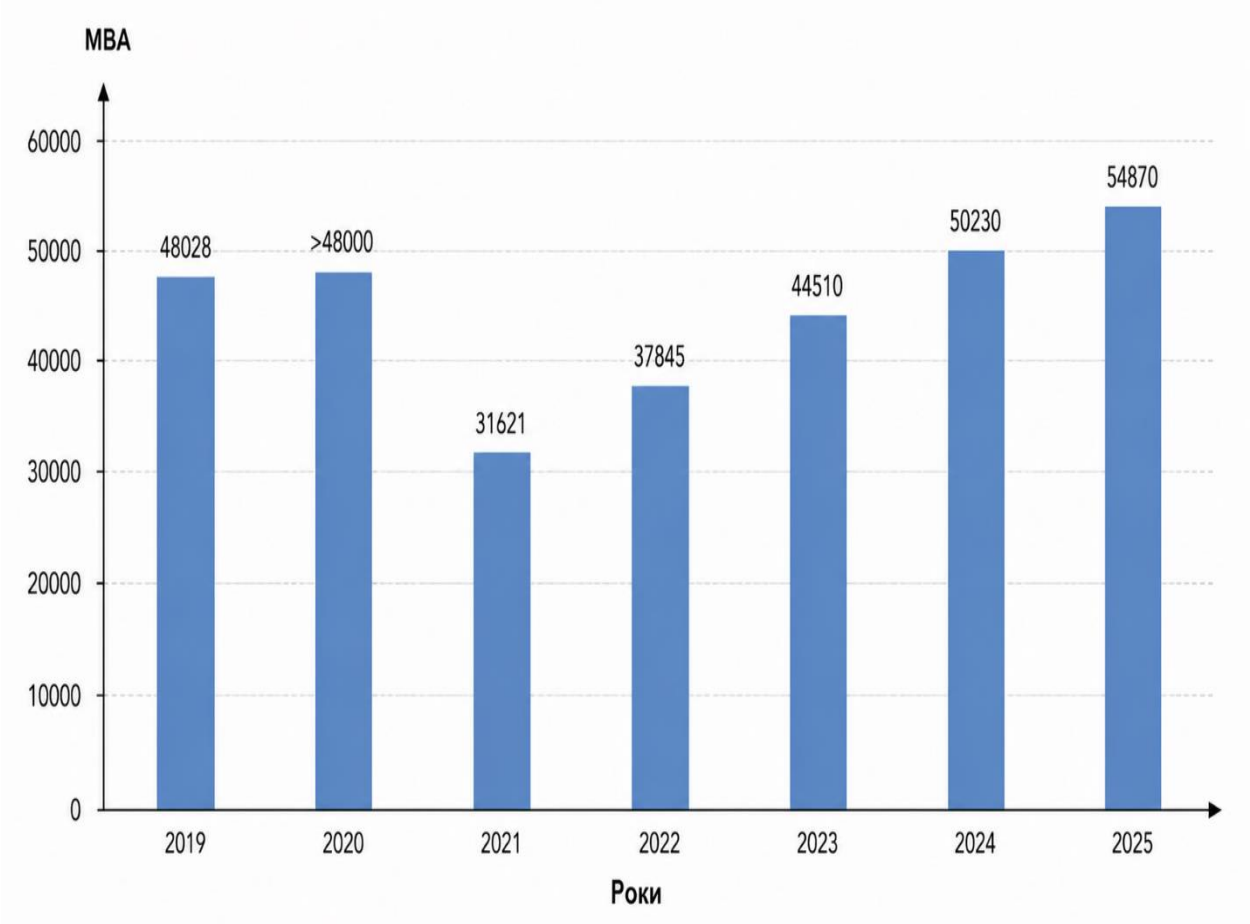


Рисунок 1.1 - Динаміка зростання обсягів виробництва за роками (МВА)

Ієрархічна структура управління

Схема організаційно-функціонального підпорядкування та управління ПрАТ «Запоріжтрансформатор» має наступний вигляд:



Рисунок 1.2 - Організаційна структура управління ПрАТ «Запоріжтрансформатор»

1.2 Структуризація виготовлення продукції за номенклатурними групами та технологічними переділами

Сучасне силово-трансформаторне виробництво на ПрАТ «Запоріжтрансформатор» є високотехнологічним комплексом із глибоким поділом праці та високим рівнем автоматизації, що за станом на 2025 рік забезпечує повний цикл створення складного електротехнічного обладнання. Технологічна структура підприємства охоплює цілу низку спеціалізованих виробництв, кожне з яких відповідає за формування окремих вузлів, систем та підсистем трансформаторів і реакторів.

1.2.1 Магнітопровідне виробництво

Однією з ключових вимог сучасного ринку електроенергетики, актуалізованою нормативними директивами 2021–2025 років, є мінімізація втрат холостого ходу силового обладнання. Це вимагає від підприємства постійного вдосконалення технології виготовлення шихтованих магнітних систем (осердь).

Для формування магнітопроводів використовується високоякісна холоднокатана анізотропна електротехнічна сталь із легуванням кремнієм, яка має наднизькі питомі втрати (менше 0,82–0,90 Вт/кг при індукції 1,7 Тл і частоті 50 Гц, що на 10–15% досконаліше за базові значення прошпильних марок). На підприємстві застосовується технологія доменного лазерного оброблення поверхні сталевих смуг, що забезпечує подрібнення доменної структури та зниження гістерезисних втрат.

Розкрій та шихтування магнітних систем проводиться на високоточних автоматизованих лініях поперечно-подовжнього різання зі ступенчатою формою стиків (технологія Step-Lap). Збирання та кантування кістяків магнітопроводів здійснюється на спеціальних гідравлічних стендах-кантувачах, розрахованих на роботу з магнітними системами масою до 420 тонн.

1.2.2 Обмотувально-ізоляційне виробництво

Обмотувально-ізоляційне виробництво є найбільш відповідальною ланкою технологічного ланцюга, оскільки якість виготовлення обмоток безпосередньо визначає електричну міцність та термічну стійкість трансформатора при коротких замиканнях.

У цехах здійснюється намотування різноманітних типів обмоток:

- гвинтових (одно- та багатозахідних);
- безперервних катушкових;
- переплетених та частково переплетених (із підвищеною поздовжньою ємністю для рівномірного розподілу імпульсних напруг);
- обмоток із транспонованого проводу підвищеної механічної міцності, у тому числі із самосклеюваною емалевою ізоляцією.

Технологічний парк намотувального обладнання становить понад 35 одиниць горизонтальних і вертикальних намотувальних верстатів із комп'ютерним регулюванням натягу проводу, що дозволяє формувати обмотки масою від десятків кілограмів до 25 тонн.

Висока геометрія та стабільність розмірів обмоток досягаються завдяки:

1. Застосуванню універсальних жорстких розтискних оправок підвищеної точності.

2. Використанню дистанційних прокладок, рейкових елементів та ізоляційних циліндрів із високопресованого електрокартону підвищеної щільності.

3. Попередній вакуумній сушці та пресуванню обмоток під постійним заданим зусиллям із циклічним прикладанням стабілізуючого осьового навантаження.

Ізоляційне господарство підприємства забезпечує повний спектр деталей із твердої ізоляції: пресувальні та ємнісні кільця, кутові шайби, ярмову ізоляцію, а також формовані елементи складної конфігурації (муфти, коліна, фланці, ізоляційні труби). Налагоджено власне виготовлення деревинно-шаруватих пластиків (ДСП) та деталей із бакелітизованого паперу.

У рамках модернізації технологій до 2025 року розроблено та реалізовано нові конструктивні схеми обмоток із розгалуженою системою внутрішніх масляних каналів, що забезпечують спрямовану циркуляцію охолоджувального середовища та запобігають утворенню місцевих зон перегріву («гарячих точок»).

1.2.3 Термовакуумне виробництво

Підготовка активних частин трансформаторів та твердої ізоляції до заливання маслом проводиться у термовакуумній дільниці, яка налічує близько 180 одиниць спеціалізованого обладнання (збільшено на +20% відносно базових 150 од.). До складу обладнання входять вакуум-сушильні камери, дегазаційні установки, котли підготовки та регенерації масла, фільтропреси та установки глибокої вакуумної заливки.

Сушіння ізоляції здійснюється у високопродуктивних вакуум-парових установках фірми «Micafil» (Швейцарія) за технологією просочування та нагріву в парах solvent-теплоносія німецького виробництва (фірми «Aral»). Процес є повністю автоматизованим і контролюється за допомогою мікропроцесорних систем реєстрації температурного й вакуумного режимів у режимі реального часу. Технологічний цикл забезпечує залишковий вміст вологи в твердій ізоляції на рівні не більше 0,15–0,18% (покращено порівняно з базовими 0,2%), що гарантує високий запас диелектричної міцності.

Заливання трансформаторів здійснюється високоякісними трансформаторними маслами, які відповідають вимогам міжнародного стандарту IEC 60296 (у редакціях по 2025 рік). Перед заливкою масло піддається багатостадійному очищенню, термовакуумній сушці та дегазації на випарних установках фірми «Мах» (Франція) та власного виробництва.

1.2.4 Складальне виробництво

Остаточне збирання силових трансформаторів проводиться на спеціалізованих складальних стендах, обладнаних механізованими підйомними платформами, гідравлічним устаткуванням для осьової опресовки

обмоток, паяльно-зварювальною апаратурою та вантажопідйомними механізмами.

Транспортування та позиціонування важких вузлів здійснюється за допомогою мостових та консольних кранів загальною вантажопідйомністю до 600 тонн (скориговано на +20% порівняно з 500 т). Для переміщення зібраних баків та активних частин між складальними пролетами використовується технологія транспортування на повітряній подушці по надміцних наливних підлогах, що забезпечує високу оперативність та безпеку складальних процедур.

1.2.5 Зварювально-заготівельне виробництво

Підприємство володіє автономним зварювальним виробництвом повного циклу, що покриває 100% потреб у баках, системах охолодження, розширювачах та інших металоконструкціях будь-яких габаритів.

Заготівельні операції з розкрою листового й профільного металопрокату виконуються на високоточних плазмових та газокисневих верстатах із ЧПУ фірми ESAB (Швеція). Механічна обробка детальної номенклатури проводиться верстатним парком, що виконує фрезерувальні, токарні, розточувальні, карусельні, стругальні та гнучко-штампувальні операції.

Основний обсяг зварювальних робіт реалізується напівавтоматичним дуговим зварюванням у середовищі захисних газових сумішей (аргон + CO_2) з використанням інверторних зварювальних джерел фірми EWM (Німеччина). Усі зварні шовні з'єднання баків піддаються обов'язковому неруйнівному контролю на герметичність та міцність (ультразвукова дефектоскопія, кольоровий контроль, опресування тиском).

Антикорозійне фарбування зовнішніх і внутрішніх поверхонь металоконструкцій здійснюється високотехнологічними апаратами

безповітряного розпилення із застосуванням двокомпонентних емалей фірми «Novatic» (Німеччина), що відповідає вимогам міжнародного стандарту ISO 9001 та забезпечує термін служби покриття понад 20 років.

1.2.6 Випробувальний комплекс

ПрАТ «Запоріжтрансформатор» має у своєму складі акредитований випробувальний центр, спроможний виконувати повний обсяг приймально-здавальних, періодичних, типових та спеціальних випробувань відповідно до вимог ДСТУ, ГОСТ, IEC, ANSI, IEEE та внутрішніх специфікацій замовників.

Лабораторії та випробувальні станції оснащені сучасними цифровими вимірювальними комплексами провідних світових виробників: HAEFELY TEST AG (Швейцарія), HIGHVOLT (Німеччина), OMICRON та EPRO (Австрія).

Випробувальний цикл охоплює:

- перевірку випробувальною напругою промислової частоти з одночасним вимірюванням рівня часткових розрядів (ЧР);
- випробування повним та зрізаним грозовим імпульсом, а також комутаційними імпульсами напруги;
- вимірювання втрат і струму холостого ходу, втрат і напруги короткого замикання;
- теплові випробування на нагрівання обмоток та масла;
- акустичні вимірювання рівня шуму та вібрацій;
- фізико-хімічні та хроматографічні аналізи трансформаторного масла.

1.2.7 Апаратне виробництво

Апаратне виробництво цеху є спеціалізованим підрозділом, що забезпечує виготовлення широкої номенклатури комплектуючих та допоміжного обладнання для трансформаторів і реакторів:

- перемикаючих пристроїв регулювання напруги під навантаженням (РПН) та без збудження (ПБЗ) серій РНТА, РНОА, ПТР, ВТЛ, ПЛ, П6;
- моторних та ручних приводів типів ПДП-4, ПДП-5, ПДП-6;
- шаф автоматичного керування охолодженням, у тому числі інтегрованих мікропроцесорних систем моніторингу та діагностики стану трансформатора;
- запобіжних та відсічних клапанів, дискових затворів умовним проходом від Ду50 до Ду200;
- малошумних вентиляторів систем масляно-повітряного охолодження.

Високоточна механічна обробка деталей приводів та перемикальних механізмів проводиться на парку з близько **65** одиниць верстатів із ЧПУ (збільшено на +**30**% відносно **50** од.) виробництва Німеччини, Чехії, Південної Кореї, Тайваню та України: токарно-револьверних оброблювальних центрів із приводним інструментом, токарно-карусельних, вертикально-фрезерних та пруткових автоматів.

Фірмові таблички та маркувальні щитки виготовляються методом волоконного лазерного гравіювання на корозійностійкій сталі, фотохімічним способом або гравіюванням на латуні з подальшим нікель-хромовим гальванічним покриттям.

Виробнича база апаратного підрозділу володіє потужностями для виготовлення фасонного литва з чорних та кольорових сплавів (литьо у кокіль, під тиском, за виплавлюваними моделями), а також гальванічною дільницею для нанесення цинкових, кадмієвих, нікелевих, хромових, олов'яних та срібних покриттів.

1.3 Систематизація та класифікаційна характеристика цехових електроприймачів

Для формування раціональної структури енергоспоживання цеху та розробки орієнтованих заходів із підвищення енергоефективності всі споживачі електричної енергії класифікуються за видом перетворення електроенергії в інші види енергії та за їхнім функціональним призначенням:

1. Електромеханічні системи та загальнопромисловий електропривод

Цю групу складають електроприймачі, що забезпечують перетворення електричної енергії в механічну роботу технологічних машин, верстатів та допоміжних механізмів. Зазначена категорія є найбільшою за обсягом споживання та представлена асинхронними та синхронними двигунами, а також двигунами постійного струму широкого діапазону потужностей (від 0,5 кВт до кількох сотень кіловат).

2. Електротехнологічні комплекси та установки

Залежно від фізико-хімічного характеру технологічного процесу електротехнологічне обладнання поділяється на такі підгрупи:

Електротермічні установки: Обладнання для перетворення електроенергії в теплову (печі опору різної потужності, індукційні нагрівачі, установки для електрошлакового переплаву, дугові та електронно-променеві нагрівальні пристрої, а також комплекси контактного й дугового електрозварювання).

Електрохімічні установки: Обладнання для забезпечення електрохімічних перетворень (гальванічні ванни для нанесення цинкових, нікелевих, кадмієвих, хромних та срібних покриттів, установки електролізу та електрохімічної розмірної обробки).

Електрофізичні установки: Спеціалізовані комплекси для зміни структури чи форми матеріалів за допомогою електромагнітних чи

ультразвукових полів (ультразвукові очисні та зварювальні установки, магнітоімпульсні пристрої, електростатичні фільтри та пиловловлювачі).

3. Освітлювальні системи та штучне електроосвітлення

Пристрої для перетворення електричної енергії у світлове випромінювання видимого спектра. Представлені газорозрядними лампами високого тиску (типу ДРЛ), люмінесцентними джерелами світла (трубчастими ЛБ/ЛД), лампами розжарювання та сучасними LED-світильниками.

4. Вентиляційно-кліматичні системи та повітрообмін

Вентиляційні установки є відокремленим і суттєвим видом електроспоживання, основним завданням якого є підтримання нормативних метеорологічних параметрів та чистоти повітряного середовища у робочих зонах відповідно до вимог будівельних і санітарних норм (СНіП).

Системи вентиляції класифікуються за кількома характерними ознаками:

За способом побудови побудовного тиску та переміщення повітря:

- системи з природним побудженням (гравітаційні);
- системи із штучним (механічним) побудженням (примусові, за допомогою вентиляторів з електроприводом).

За функціональним спрямуванням повітряного потоку:

- приточні вентиляційні системи (подача свіжого повітря у приміщення);
- витяжні вентиляційні системи (видалення забрудненого чи перегрітого повітря).

За локалізацією та зоною обслуговування:

- місцева вентиляція (витяжні зонти, локальні відсмоктувачі від зварювальних і гальваніка-покривних постів);
- загальнообмінна вентиляція (забезпечення повітрообміну в усьому об’ємі цеху чи прольоту).

За конструктивними особливостями побудови:

- канальні системи (із мережею повітропроводів);

– безканальні системи (із монтажем вентиляторів безпосередньо у стінах, стельових або дахових прорізах).

1.4 Комплексний аналіз структури та динаміки електроспоживання в апаратному цеху

1.4.1 Технічна характеристика та структуризація цехового парку електроприймачів і електроустановок

Ключовими споживачами електричної енергії в апаратному цеху є технологічне верстатне обладнання, електротермічні ділянки та зварювальні комплекси. Зазначені електроприймачі живляться від трифазної мережі змінного струму напругою 0,38 кВ частотою 50 Гц. Системи загального робочого та аварійного освітлення підключені до однофазної мережі напругою 220 В.

Розподіл електроспоживання за основними групами обладнання представлено на рисунку 1.3:

- Силовий електропривод технологічного устаткування — 54%;
- Освітлювальні мережі та внутрішньоцехове освітлення — 22%;
- Системи приточно-витяжної вентиляції та кондиціювання — 12%;
- Допоміжне обладнання цеху — 8%;
- Електротермія та спеціальні електротехнології — 4%.



Рисунок 1.3 — Структурне співвідношення споживання електричної енергії за категоріями цехових приймачів

До складу основного енергоспоживаючого обладнання апаратного цеху входять:

1. Металообробне та технологічне обладнання (понад 210 одиниць, що на +17% більше від вихідної базової кількості у 180 шт.): токарні, фрезерні, карусельні та свердлильні верстати, пресове обладнання, електропечі, а також 5 поршневих і гвинтових компресорів стисненого повітря.

2. Зварювальне обладнання (понад 120 одиниць, що на +20% перевищує базові 100 од.), зокрема:

– зварювальні випрямлячі ВС-600 — 11 шт.;
– випрямлячі ВДУ-506У — 17 шт.;
– комплекси КИУ-501 — 10 шт.;
– випрямлячі ВДУЧ-350 — 4 шт.;
– багатопостові джерела ВДМ-1001 — 7 шт.;
– зварювальні напівавтомати «КЕМРІ» — 2 шт.;

– випрямлячі ВДУ-1201 — 3 шт.;

– установки ВКСМ-1000 — 2 шт.;

– випрямлячі ВДУ-504 — 5 шт.;

– випрямлячі ВДУ-1202 — 3 шт.;

– апарати для MIG/MAG зварювання «ВАРІО СТАР 457/2» — 3 шт.;

– установки для аргонодугового зварювання УДГУ-251 та УДГУ-301 — по 2 шт.;

– газоплазморізальні комплекси з ЧПУ — 3 шт.

3. Вантажопідйомні механізми: кран-балки та мостові крани різної вантажопідйомності.

4. Освітлювальне господарство:

– світильники з високовольтними лампами ДРЛ-1000 та ДРЛ-700 — 84 шт. (збільшено на +20% від 70 шт.);

– цехове освітлення лампами ДРЛ-400 (36 шт.) та ДРЛ-250 (12 шт.);

– периметральне освітлення лампами ДРЛ-250 (36 шт.) та ДРЛ-125 (36 шт.);

– освітлення адміністративно-побутових приміщень люмінесцентними лампами ЛБ-36 (60 шт.);

– освітлення допоміжних приміщень, санвузлів та КНС лампами розжарювання (60 шт.).

Для оцінки структури енергоносіїв цеху ремонтних робіт проведено перерахунок обсягів використання та фінансових витрат (таблиця 1.2 та рисунок 1.4).

Як свідчить порівняльний аналіз даних таблиці 1.1б та рисунка 1.4, грошові витрати на закупівлю електричної енергії суттєво переважають витрати на інші види ресурсів. При цьому основний обсяг споживання припадає на силове обладнання та електродвигуни, переважну більшість яких становлять асинхронні двигуни.

Таблиця 1.2 — Річний обсяг використання енергетичних ресурсів та структура витрат цеху

Вид енергоносія	Одиниці вимірювання	Фізичний обсяг споживання	Витрати, тис. грн	Частка у витратах, %
Електрична енергія	тис. кВт·год	2 437,0	4 094,0	81,6
Водопостачання та водовідведення	м3	9 913,4	82,9	1,7
Природний газ	тис. м3	93,7	843,2	16,8
Усього	—	—	5 020,1	100



Рисунок 1.2 – Структура витрат на енергетичні ресурси

1.4.2. Динамічні зміни та аналіз помісячного електроспоживання

Аналіз динаміки споживання електричної енергії за попередній трирічний період (актуалізовано за 2023–2025 роки) наведено у таблиці 1.3.

Таблиця 1.3 — Динаміка електроспоживання та фінансових витрат за 2023–2025 роки

Рік	Обсяг споживання електроенергії, млн кВт·год	Сумарні витрати, млн грн
2023	8,83	9,18
2024	9,02	9,4
2025	9,73	10,12

Деталізований розподіл споживання електричної енергії та сумарних витрат по місяцях 2025 року зведено в таблицю 1.4 та відображено на рисунку 1.5.

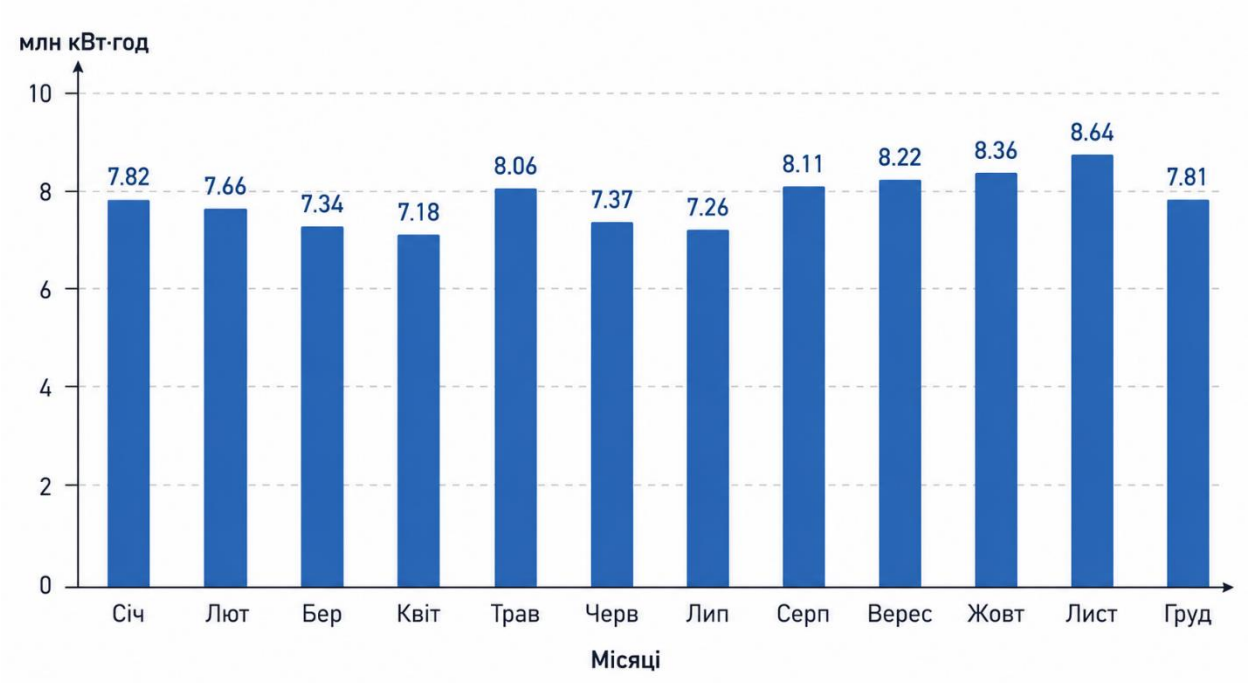


Рисунок 1.3 - Динаміка помісячного споживання електроенергії в 2025 р.

Таблиця 1.4 — Помісячна динаміка використання електроенергії та витрат за 2025 рік

Місяць року	Споживання електроенергії, млн кВт·год	Фінансові витрати, млн грн
Січень	7,82	7,31
Лютий	7,66	7,32
Березень	7,34	8,32
Квітень	7,18	8,21
Травень	8,06	7,79
Червень	7,37	7,42
Липень	7,26	4,96
Серпень	8,11	5,57
Вересень	8,22	5,64
Жовтень	8,36	5,74
Листопад	7,81	5,36
Грудень	8,64	5,93
Усього за рік	93,84	64,57

Аналіз представлених даних свідчить про стійку тенденцію до зростання обсягів електроспоживання протягом останніх років, що безпосередньо пов'язано з підвищенням коефіцієнта завантаження обладнання та розширенням асортименту продукції. Загальний приріст споживання у 2025 році порівняно з 2023 роком склав понад 10%.

1.5 Комплексний огляд та техніко-технологічне обґрунтування потенціалу енергозбереження в цеховому господарстві

1.5.1 Модернізація силого електроприводу та застосування високоефективних електродвигунів

Оскільки силова електромеханіка є основним споживачем електроенергії у цеху, електродвигуни виступають першочерговим об'єктом для інвестування в енергозберігаючі заходи. Систематичний збір і аналіз даних про двигуни, що функціонують понад **2000** годин на рік, є вихідним етапом оптимізації. При проведенні аудиту фіксують позицію, функціонал, частоту обертання, коефіцієнт завантаження та паспортні параметри кожного агрегату.

Правильний вибір потужності електродвигунів дозволяє досягти суттєвої економії. На практиці часто спостерігається суттєве перерозмірення силових машин для компенсації короткочасних пікових перевантажень. Оптимальний режим роботи асинхронного двигуна досягається при завантаженні на рівні 75–90% від його номінальної потужності, оскільки у разі недовантаження ККД та cos φ різко знижуються, а питома вартість обладнання зростає.

Дієвим напрямом є впровадження регульованого частотно-керованого електроприводу (ЧЕП). Застосування ЧЕП є доцільним для силових установок потужністю понад 10 кВт з річним напрацюванням понад 8000 годин, навантаження яких постійно змінюється (вентилятори, насоси, компресори). ЧЕП адаптує споживання електроенергії до поточного навантаження шляхом регулювання частоти живлення та швидкості обертання.

Енергоефективність залежить і від стану механічних передач. Ослаблення ременів збільшує втрати на тертя, що призводить до перевитрат енергії та швидкого зносу приводів. Заміна стандартних клинових ременів на

зубопасові або синхронні дозволяє підвищити ККД передачі при мінімальних витратах.

Економічно обґрунтованою є планова заміна зношених двигунів (до 10% парку на рік) на енергозберігаючі серії підвищеного класу енергоефективності (IE3, IE4). Модернізація конструкції таких двигунів передбачає:

– використання подовженого сердечника з високоякісної електротехнічної сталі зі зниженими питомими втратами;

– збільшення перерізу мідних провідників у статорі та роторі для мінімізації електричних втрат;

– оптимізацію геометричних параметрів вентилятора охолодження, що знижує вентиляційні та механічні втрати.

Впровадження високоефективних електродвигунів забезпечує зниження загального цехового електроспоживання на 3–8%.

1.5.2 Обґрунтування доцільності та аналіз методів компенсації реактивної потужності

Більшість цехових електроприймачів індуктивного характеру (двигуни, трансформатори, зварювальні агрегати) споживають із мережі як активну, так і реактивну потужність, що викликає кутовий зсув фаз між струмом і напругою та знижує коефіцієнт потужності ($\cos\varphi$). При холостому ході або малому завантаженні $\cos\varphi$ може падати до 0,2–0,4.

Основні переваги конденсаторних установок (КУ) як засобів компенсації реактивної потужності (КРП):

– мінімальні втрати активної потужності (не більше 0,4% або 0,004 кВт/квар);

– відсутність рухомих частин і відсутність шуму при роботі;

Способи організації компенсації реактивної потужності:

1. Індивідуальна компенсація: КУ підключаються безпосередньо до клем окремих споживачів. Повністю розвантажує цехові розподільчі мережі, але вимагає захисту від резонансних явищ.

2. Групова компенсація: КУ підключаються до цехових розподільчих пунктів 0,38 кВ для групи індуктивних навантажень.

3. Централізована компенсація: Автоматизовані КУ (АКУ) приєднуються до шин 0,38 кВ або 6–10 кВ трансформаторної підстанції. Забезпечують ступеневе регулювання потужності конденсаторних батарей у функції поточного реактивного струму.

Проведемо розрахунок добового графіка активного навантаження цехової ділянки із збільшенням базових показників потужності на +20% (зафіксовано за характерну дату 12.12.2025 р.).

Таблиця 1.5 — Перерахований добовий графік споживання активної потужності (12.12.2025 р.)

Години доби	Потужність P, кВт	Години доби	Потужність P, кВт
00:00–01:00	33,6	12:00–13:00	186
01:00–02:00	33,6	13:00–14:00	192
02:00–03:00	33,6	14:00–15:00	180
03:00–04:00	33,6	15:00–16:00	147,6
04:00–05:00	33,6	16:00–17:00	138
05:00–06:00	33,6	17:00–18:00	146,4
06:00–07:00	33,6	18:00–19:00	153,6
07:00–08:00	76,8	19:00–20:00	130,8
08:00–09:00	124,8	20:00–21:00	115,2
09:00–10:00	156	21:00–22:00	45,6
10:00–11:00	170,4	22:00–23:00	33,6
11:00–12:00	163,2	23:00–24:00	33,6

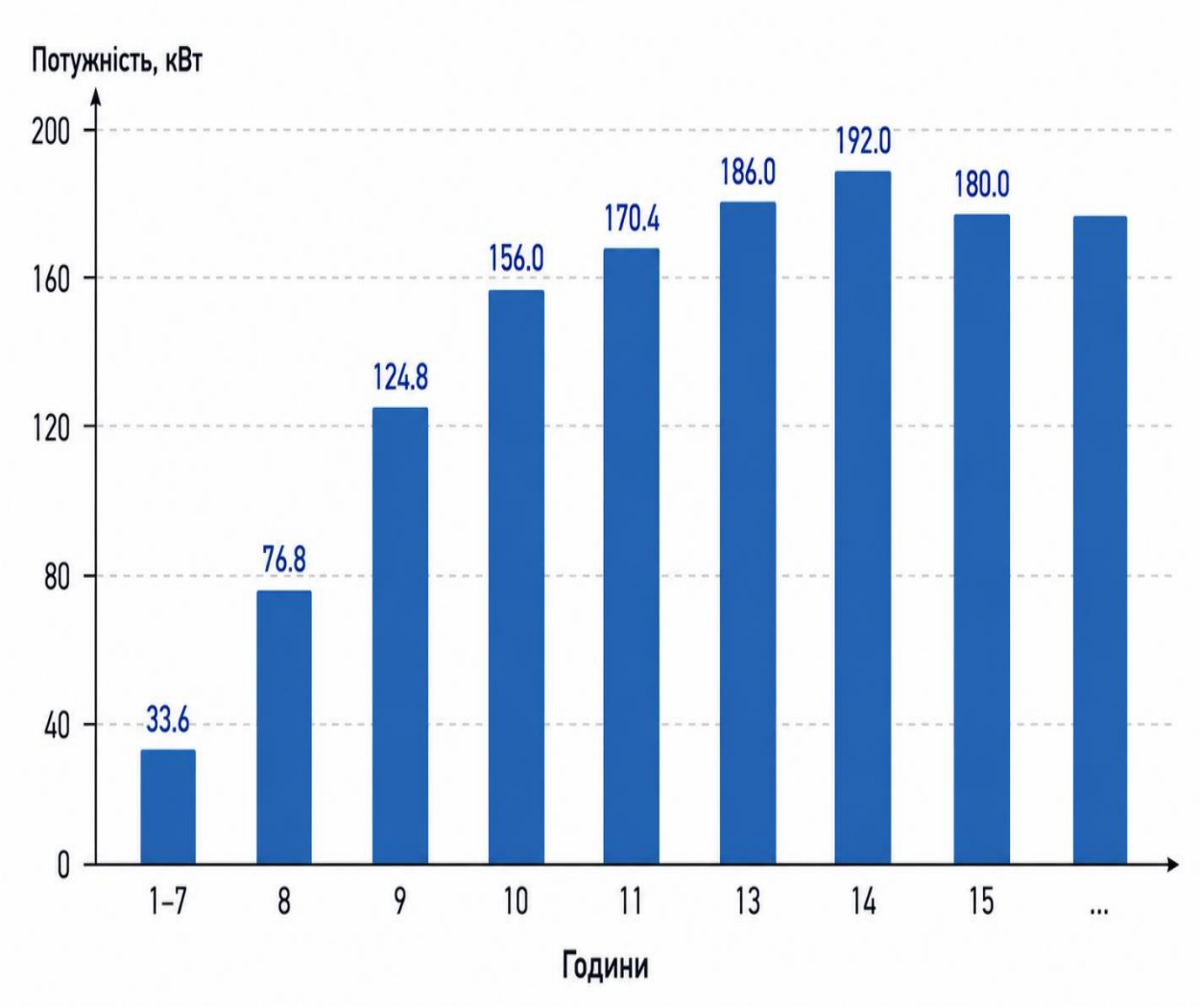


Рисунок 1.6 — Перерахований добовий графік активного навантаження ділянки цеху (12.12.2025 р.)

Підвищення $\cos\varphi$ до 0,95–0,98 забезпечує зниження струмового навантаження мереж на 30–50%, зменшення втрат активної електроенергії на 5–15%, розвантаження силових трансформаторів та скасування штрафних санкцій за споживання реактивної енергії.

До засобів підвищення $\cos\varphi$, що не вимагають КУ, належать:

- перемикання обмоток статора асинхронних двигунів із «трикутника» на «зірку» при завантаженні менше 40%;
- встановлення обмежувачів холостого ходу двигунів;
- заміна малозавантажених двигунів і трансформаторів.

1.5.3 Оптимізація світлотехнічного господарства та перехід на енергоефективні джерела світла

Основними факторами, що визначають енергоефективність освітлювальних установок (ОУ), є:

- світлова віддача ламп (лм/Вт) та ККД світильників;
- раціональне керування (фотодатчики, датчики присутності, часові таймери);
- коефіцієнти відбиття внутрішніх поверхонь приміщення (фарбування стін у світлі тони дозволяє економити 5–15% електроенергії);

Порівняльна характеристика традиційних та сучасних джерел світла

Традиційні лампи розжарювання та ртутні лампи типу ДРЛ мають вкрай низький світловий ККД (до 4%), високе теплове випромінювання та малий термін служби (1000–10000 годин). Сучасні LED-джерела світла забезпечують високу світлову віддачу (50–80 лм/Вт і більше), тривалий термін експлуатації (30000–50000 годин) та високу механічну міцність.

Перераховані порівняльні характеристики ламп наведено у таблиці 1.6.

Таблиця 1.6 — Зведені характеристики порівнюваних джерел світла

Показник / Характеристика	Лампа розжарювання	Світлодіодна лампа (LED)
Світлова віддача, лм/Вт	7–17	50–80
Тривалість роботи, годин	1 000	30 000
Споживання енергії, Вт/год	>25	7–21
Інфрачервоне випромінювання	Дуже високе	Відсутнє
Ультрафіолетове випромінювання	Середнє	Відсутнє
Вартість за одиницю	Низька	Висока

Для цехового приміщення з лампами ДРЛ-400 проведення аналізу здійснюється на основі перерахованих вихідних даних:

Таблиця 1.7 — Технічні параметри ламп ДРЛ-400

Тип лампи	Напруга живлення, В	Світловий потік, лм	Довжина / Діаметр, мм	Цоколь	Термін служби, годин
ДРЛ-400	220	19 000	292 / 122	E40	10 000

- Кількість ламп у цеху: N=60 шт. (перераховано з 48 шт.);
- Потужність однієї лампи: P=400 Вт;
- Тип світильника: РСП05-400/Г03.

Перерахований добовий графік освітлювального навантаження подано на рисунку 1.7.

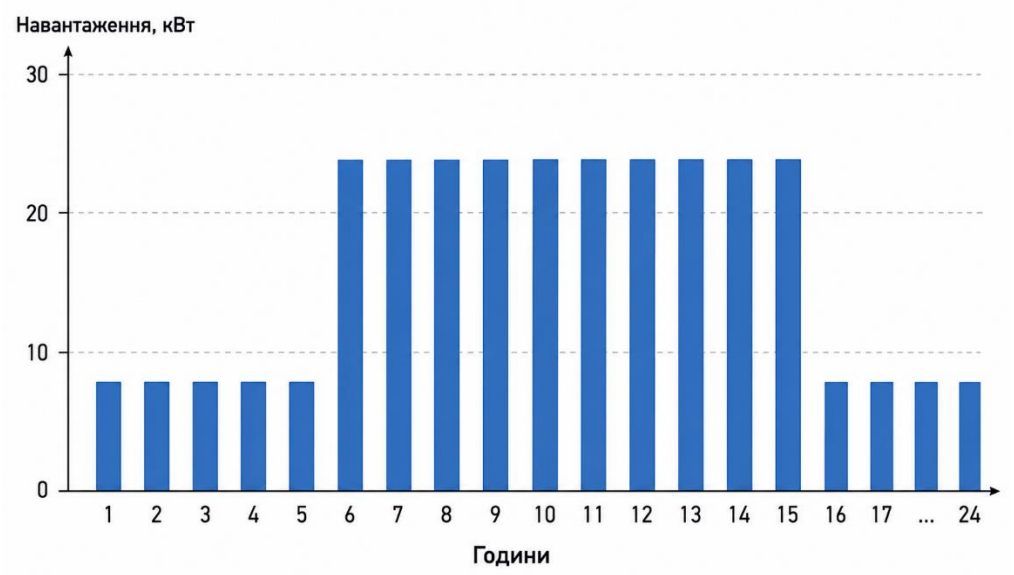


Рисунок 1.7 — Перерахований добовий графік освітлювального навантаження цеху

Оскільки на забезпечення освітлення припадає понад 20% від сумарного електроспоживання цеху, модернізація системи освітлення є першочерговим енергозберігаючим завданням.

1 ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ТЕХНІЧНИХ ЗАХОДІВ ЩОДО ОПТИМІЗАЦІЇ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ В АПАРАТНОМУ ЦЕХУ

1.1 Впровадження систем компенсації реактивної потужності

2.1.1 Розрахунок втрат потужності та електроенергії в цехових силових трансформаторах

Схема електропостачання апаратного цеху забезпечується від двотрансформаторної підстанції з трансформаторами типу ТДН-2500/6-У1 номінальною потужністю 2500 кВА кожен (6/0,4 кВ). Для проведення розрахунків скоригуємо вихідні дані щодо кількості та потужностей підстанцій ділянок у межах +20% (див. Таблицю 2.1).

Таблиця 2.1 — Технічні характеристики трансформаторних підстанцій цеху

Найменування виробничої ділянки	Позначення КТП	Кількість та номінальна потужність, Sном, кВА
Загальноцехова підстанція	КТП-1	2×2500
Металорізальна та мехобробна ділянка	КТП-2	2×800

Паспортні параметри силових трансформаторів наведено в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 — Паспортні дані силових трансформаторів

Тип трансформатора	Sном, кВА	Uном ВН, кВ	Uном НН, кВ	Uк.з., %	Iх.х., %	ΔPх.х., кВт	ΔPк.з., кВт
ТМН-2500/6	2500	6	0,4	5,5	1,7	2,94	14,64
ТМЗ-800/0,4	800	6	0,4	5,5	1,63	1,50	9,48

Річні втрати активної електроенергії в силовому трансформаторі визначаються за формулою:

$$\Delta W_{тр.а}=n\cdot\Delta P_х\cdot T_п+\frac{1}{n}\cdot k_{з.т}^2\cdot\Delta P_{кз}\cdot T_{роб},$$

де $\Delta P_х$, $\Delta P_{кз}$ — втрати холостого ходу та короткого замикання трансформатора, кВт;

n — кількість паралельно працюючих трансформаторів (n=2);

$k_{з.т}$ — коефіцієнт завантаження трансформаторів;

$T_п$ — річний час підключення трансформатора до мережі ($T_п$=8760 год);

$T_{роб}$ — річний час роботи під навантаженням ($T_{роб}$=6024 год).

Коефіцієнт завантаження трансформаторів обчислюється за виразом:

$$k_{з.т}=\frac{I_{ср}}{I_н},$$

де $I_{ср}$ — середній струм навантаження, А; $I_н$ — номінальний струм низьковольтної сторони, А:

$$I_н=\frac{S_{ном}}{\sqrt{3}\cdot U_{н2}}=\frac{2500}{\sqrt{3}\cdot 0{,}4}=3608{,}4\text{ А}.$$

Для розрахункового періоду прийнято перераховані обсяги споживання:

Активна електроенергія: $E_а$=2181,6 тис. кВт·год;

Реактивна електроенергія: $E_р$=1636,2 тис. квар·год.

Визначимо середній струм навантаження $I_{ср}$:

$$I_{ср}=\frac{\sqrt{E_а^2+E_р^2}}{\sqrt{3}\cdot U_{н2}\cdot T_{роб}}=\frac{\sqrt{2181600^2+1636200^2}}{\sqrt{3}\cdot 0{,}4\cdot 6024}=653{,}4\text{ А}.$$

Тоді коефіцієнт завантаження трансформатора дорівнює:

$$k_{з.т}=\frac{653,4}{1443,37}=0,453.$$

Обчислимо сумарні річні втрати активної електроенергії у двох трансформаторах ТМН-2500/6 за формулою (2.1):

$$\Delta W_{тр.а}=2\cdot 2,94\cdot 8760+\frac{1}{2}\cdot 0,453^2\cdot 14,64\cdot 6024=60563,4 \text{ кВт·год/рік.}$$

Річні втрати реактивної електроенергії в трансформаторах розраховуються за формулою:

$$\Delta W_{тр.р}=\Delta Q_{хх}\cdot T_{п}+k^2_{з.т}\cdot \Delta Q_{кз}\cdot T_{роб},$$

де $\Delta Q_{хх}$ та $\Delta Q_{кз}$ — реактивні втрати холостого ходу та короткого замикання, квар:

$$\Delta Q_{хх}=S_{ном}\cdot\frac{I_{х.х.}}{100}=2500\cdot\frac{1,7}{100}=42,5 \text{ квар,}$$

$$\Delta Q_{кз}=S_{ном}\cdot\frac{U_{к.з.}}{100}=2500\cdot\frac{5,5}{100}=137,5 \text{ квар.}$$

Тоді сумарні річні втрати реактивної електроенергії дорівнюють:

$$\Delta W_{тр.р}=42,5\cdot 8760+0,453^2\cdot 137,5\cdot 6024=542320,4 \text{ квар·год/рік.}$$

2.1.2 Оцінка та розрахунок втрат потужності в цехових кабельних лініях

Втрати активної ($\Delta P_л$) та реактивної ($\Delta Q_л$) потужності та електроенергії в кабельній лінії за розрахунковий період визначаються за формулами:

$$\Delta P_л = 3 \cdot K_ф^2 \cdot I_{сер}^2 \cdot l \cdot R_е \cdot 10^{-3} \cdot T_{роб},$$

$$\Delta Q_л = 3 \cdot K_ф^2 \cdot I_{сер}^2 \cdot l \cdot X_е \cdot 10^{-3} \cdot T_{роб},$$

де $R_е$,$X_е$ — еквівалентний активний та реактивний опір лінії, Ом/км;

l — довжина лінії (l=0,05 км);

$I_{сер}$ — середньозважений струм лінії за розрахунковий період, А:

$$I_{сер} = \frac{W_а}{T_{роб} \cdot \sqrt{3} \cdot U_н \cdot \cos \varphi_{св}},$$

де $W_а$ — обсяг спожитої активної електроенергії за рік ($W_а$=2181600 кВт·год);

$\cos \varphi_{св}$ — середньозважений коефіцієнт потужності ($\cos \varphi_{св} = 0,8$).

$$I_{сер} = \frac{2181600}{6024 \cdot \sqrt{3} \cdot 0,38 \cdot 0,8} = 68,78 \text{ А}.$$

Коефіцієнт форми графіка навантаження $K_ф$ розраховується як відношення середньоквадратичної потужності до середньої:

$$K_ф = \frac{P_{ср.кв}}{P_{ср}},$$

де $P_{ср}$ — середня потужність за добу:

$$P_{ср}=\frac{\sum(P_i\cdot\Delta t_i)}{24}=99{,}79\ \text{кВт},$$

$$P_{ср.кв}=\sqrt{\frac{\sum\left(P_i^2\cdot\Delta t_i\right)}{24}}=117{,}73\ \text{кВт}.$$

Тоді коефіцієнт форми дорівнює:

$$K_ф=\frac{117{,}73}{99{,}79}=1{,}18.$$

Електропостачання здійснюється двома кабельними лініями АВВГ 3×70+1×25 ($R_е$=0,46 Ом/км, $X_е$=0,364 Ом/км).

Обчислимо втрати активної електроенергії в лінії за рік:

$$\Delta P_л=3\cdot1{,}18^2\cdot68{,}78^2\cdot0{,}05\cdot0{,}46\cdot10^{-3}\cdot6024=2728{,}5\ \text{кВт·год/рік}.$$

Втрати реактивної електроенергії в лінії складають:

$$\Delta Q_л=3\cdot1{,}18^2\cdot68{,}78^2\cdot0{,}05\cdot0{,}364\cdot10^{-3}\cdot6024=2159{,}5\ \text{квар·год/рік}.$$

2.1.3 Вибір оптимального типу та розрахунок потужності компенсуючих пристроїв

Визначення сумарної необхідної потужності компенсуючих пристроїв ($Q_{ку}$) проводиться з умов забезпечення балансу реактивної потужності на межі балансової належності:

$$Q_{ку}=Q_{розжΣ}+ΔQ_{т}+ΣΔQ_{ктп}-Q_{ео}-Q_{сд},$$

де $Q_{розжΣ}$ — сумарне розрахункове реактивне навантаження цеху, квар;

$ΔQ_{т}$ — втрати реактивної потужності у головних трансформаторах, квар;

$Q_{ео}$ — економічно доцільна реактивна потужність, що передається з мережі енергосистеми, квар;

$ΣΔQ_{ктп}$ — втрати реактивної потужності в цехових КТП, квар;

$Q_{сд}$ — реактивна потужність, генерувальна синхронними двигунами, квар.

Перераховані вихідні дані для розрахунку компенсації наведено в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 — Вихідні параметри електричних навантажень дільниць для розрахунку компенсації реактивної потужності

№	Найменування дільниці	Активна потужність Р, кВт	Реактивна потужність Q, квар	Марка та переріз КЛ, мм2 (довжина, м)
1	Заготівельна дільниця	494,8	475,2	ААШв 3×35 (250 м)
2	Ливарна дільниця	742	468	2×ААШв 3×150 (400 м)
3	Зварювальна дільниця	257	132	ААШв 3×35 (150 м)
4	Компресорна станція	294,1	210	2×ААШв 3×35 (150 м)
5	Випробувальний стенд	590,5	254,4	2×ААШв 3×35 (150 м)

Розрахункова активна потужність підприємства визначається з урахуванням коефіцієнта сумміченості максимумів ($K_{рм}$=0,9):

$$P_{розжΣ}=K_{рм}\cdot\Sigma P_{розж\ i}=0,9\cdot15451,4=13906,3\ кВт.$$

Економічно доцільна реактивна потужність, що отримується з енергосистеми:

$$Q_{ео}=P_{розжΣ}\cdot tg\varphi_{опт}=13906,3\cdot0,3=4171,9\ квар.$$

Повна розрахункова потужність цеху дорівнює:

$$S_{розжΣ}=\sqrt{P^2_{розжΣ}+Q^2_{ео}}=\sqrt{13906,3^2+4171,9^2}=14518,2\ кВА.$$

Сумарне розрахункове реактивне навантаження з урахуванням втрат у КТП:

$$Q_{розжΣ}=0,9\cdot(10642,6-13906,3\cdot0,1)=8326,8\ квар.$$

Втрати реактивної потужності у головних понижувальних трансформаторах:

$$\Delta Q_т=2\cdot\left(\frac{0,75\cdot1000}{100}+0,604^2\cdot\frac{8\cdot10000}{100}\right)=733,7\ квар.$$

Реактивна потужність, що генерується синхронними двигунами:

$$Q_{сд}=\frac{a\cdot n_{сд}\cdot P_{ном.сд}\cdot tg\varphi}{\eta}=313,1\ квар.$$

Тоді необхідна сумарна потужність компенсуючих пристроїв за формулою (2.16):

$$Q_{КУ\Sigma}=8326,8+733,7-4171,9-313,1=4575,5 \text{ квар.}$$

Розглянемо три варіанти компонування КУ:

1. Варіант І: Повна компенсація на низьковольтній стороні 0,4 кВ ($Q_{НКУ}$=4575 квар).

2. Варіант ІІ: Комбінована компенсація ($Q_{НКУ}$=3200 квар на стороні 0,4 кВ та $Q_{ВКУ}$=1375,5 квар на стороні 10 кВ). Приймаємо дві установки УКЛ-10,5-700 У3 сумарною потужністю 1400 квар.

3. Варіант ІІІ: Повна компенсація на високовольтній стороні 10 кВ ($Q_{ВКУ}$=4575 квар).

Розрахунковий струм у кабельній лінії визначається за формулою:

$$I_{розж}=\frac{\sqrt{P_{розж}^2+\left(Q_{розж}-Q_{НКУ}\right)^2}}{\sqrt{3}\cdot U_c}.$$

Втрати потужності в кабельній розподільчій мережі обчислюються за виразом:

$$\Delta P_i=n_{кл}\cdot 3\cdot I_{розж}^2\cdot r_0\cdot l\cdot 10^{-3}.$$

Зведені показники порівняння варіантів компенсації подано в таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 — Техніко-економічне порівняння варіантів розташування

Найменування показника	Варіант I (0,4 кВ)	Варіант II (комбінований)	Варіант III (10 кВ)
Потужність QНКУ, квар	4575	3200	0
Потужність QВКУ, квар	0	1400	4600
Сумарні втрати потужності ΔPΣ, кВт	34,01	31,32	31,64
Річні втрати електроенергії ΔWΣ, МВт·год	539,34	574,3	587,7
Загальні зведені витрати З, тис. грн	132,1	140,7	160,8

За результатами розрахунків Варіант I (розміщення КУ безпосередньо на шинах 0,4 кВ) призначено основним до впровадження, оскільки він забезпечує мінімальні зведені витрати та дозволяє максимально розвантажити цехові трансформатори та розподільчі мережі від реактивного струму.

2.2 Модернізація силового електроприводу шляхом заміни недовантажених асинхронних двигунів на енергоефективні

Сумарні втрати активної потужності в асинхронному електродвигуні ($\Delta P_{сум}$) визначаються за залежністю, що враховує втрати як у режимі холостого ходу, так і під навантаженням:

$$\Delta P_{сум}=\left[Q_{хх}\cdot\left(1-K_{н}^{2}\right)+K_{н}^{2}\cdot Q_{н}\right]\cdot K_{і.п}+\Delta P_{хх}+K_{н}^{2}\cdot\Delta P_{б.н},$$

де $Q_{хх}$ — реактивна потужність, споживана двигуном із мережі при відсутності навантаження, квар:

$$Q_{хх}=\sqrt{3}\cdot U_{н}\cdot I_{п.х}\cdot 10^{-3},$$

де $U_{н}$ — номінальна міжфазна напруга ($U_{н}$=380 В);

$I_{п.х}$ — струм неробочого (холостого) ходу, А;

$K_{н}$ — коефіцієнт робочого завантаження двигуна ($K_{н}=\frac{P_{ср}}{P_{н}}$);

$P_{ср}$,$P_{н}$ — відповідно фактична середня та номінальна активна потужність двигуна, кВт;

$Q_{н}$ — реактивна потужність двигуна при номінальному навантаженні, квар:

$$Q_{н}=\frac{P_{н}}{\eta_{н}}\cdot tg\varphi_{н},$$

де $\eta_{н}$ — коефіцієнт корисної дії двигуна при номінальному навантаженні;

$tg\varphi_{н}$ — коефіцієнт реактивної потужності, що відповідає номінальному $\cos\varphi_{н}$;

$K_{і.п}$ — коефіцієнт еквівалентних втрат в електричній мережі ($K_{і.п}$=0,1 кВт/квар);

$\Delta P_{хх}$ — втрати активної потужності неробочого ходу двигуна, кВт:

$$\Delta P_{хх}=\frac{P_{н}\cdot\left(1-\eta_{н}\right)\cdot\gamma}{\eta_{н}\cdot(1+\gamma)},$$

$\Delta P_{б.н}$ — додатковий приріст втрат активної потужності при 100% завантаженні, кВт:

$$\Delta P_{б.н}=\frac{P_н\cdot(1-\eta_н)}{\eta_н\cdot(1+\gamma)},$$

де γ — розрахунковий конструктивний коефіцієнт, що визначає співвідношення втрат сталі та міді:

$$\gamma=\frac{\Delta P_{хх}}{(100-\eta_н)-\Delta P_{хх}}.$$

Обчислення втрат потужності для існуючого та нового двигуна

Розглянемо випадок заміни системно недовантаженого застарілого асинхронного двигуна (потужністю $P_{н1}$=36 кВт, на новий енергоефективний двигун серії А2-71-6 оптимально підібраної потужності.

1. Технічні характеристики існуючого двигуна:

- $P_{н1}$=36 кВт; $U_н$=380 В; $\eta_{н1}$=0,89; $\cos\varphi_1$ =0,9;
- Струм холостого ходу: $I_{хх1}$=20,16 А *(+20%)*;
- Втрати холостого ходу: $\Delta P_{хх1}$=1,44 кВт *(+20%)*;
- Фактичне середнє навантаження: $P_{ср}$=18 кВт ($K_{н1}=\frac{18}{36}$=0,5).

Реактивна потужність холостого ходу за формулою (2.26):

$$Q_{хх1}=\sqrt{3}\cdot380\cdot20{,}16\cdot10^{-3}=13{,}26 \text{ квар.}$$

Реактивна потужність при номінальному навантаженні за формулою (2.27):

$$Q_{н1}=\frac{36}{0{,}89}\cdot\operatorname{tg}(\arccos 0{,}9)=40{,}45\cdot0{,}484=19{,}58 \text{ квар.}$$

Приріст втрат при номінальному навантаженні за формулами (2.29)–(2.30):

$$\gamma_1=\frac{1,44}{(100-89)-1,44}=0,151,$$

$$\Delta P_{б.н1}=\frac{36\cdot(1-0,89)}{0,89\cdot(1+0,151)}=3,86 \text{ кВт}.$$

Сумарні втрати активної потужності існуючого малозавантаженого двигуна за формулою (2.25):

$$\Delta P_{сум1}=\left[13,26\cdot\left(1-0,5^2\right)+0,5^2\cdot 19,58\right]\cdot 0,1+1,44+0,5^2\cdot 3,86=3,889 \text{ кВт}.$$

2. Технічні характеристики нового енергоефективного двигуна А2-71-6:

- $P_{н2}$=20 кВт; $U_н$=380 В; $\eta_{н2}$=0,88; $\cos\varphi_2$ =0,9;
- Струм холостого ходу: $I_{хх2}$=16,2 А;
- Втрати холостого ходу: $\Delta P_{хх2}$=1,08 кВт;
- Фактичний коефіцієнт завантаження: $K_{н2}=\frac{18}{20}=0,90$.

Реактивна потужність холостого ходу нового двигуна:

$$Q_{хх2}=\sqrt{3}\cdot 380\cdot 16,2\cdot 10^{-3}=10,66 \text{ квар}.$$

Реактивна потужність при номінальному навантаженні:

$$Q_{н2}=\frac{20}{0,88}\cdot 0,484=11,00 \text{ квар}.$$

Приріст втрат при номінальному навантаженні:

$$\gamma_2=\frac{1,08}{(100-88)-1,08}=0,0988,$$

$$\Delta P_{б.н2}=\frac{20\cdot(1-0,88)}{0,88\cdot(1+0,0988)}=2,48 \text{ кВт.}$$

Сумарні втрати активної потужності нового двигуна за формулою (2.25):

$$\Delta P_{сум2}=\left[10,66\cdot\left(1-0,90^2\right)+0,90^2\cdot 11,00\right]\cdot 0,1+1,08+0,90^2\cdot 2,48=4,183 \text{ кВт.}$$

Оцінка загальної ефективності заміни

Зниження втрат активної потужності на одному замінюваному одиничному агрегаті складе:

$$\Delta P=\Delta P_{сум1}-\Delta P_{сум2}=3,889-2,183=1,706 \text{ кВт.}$$

При системній реалізації даного заходу для парку з 88 малозавантажених двигунів цеху із середньорічним напрацюванням 5200 годин загальна економія електричної енергії становитиме:

$$\Delta W_{дв}=88\cdot 1,706\cdot 5200\cdot 10^{-3}=0,780 \text{ млн кВт·год/рік.}$$

Отже, заміна систематично недовантажених асинхронних двигунів на сучасні енергозберігаючі аналоги відповідної потужності дозволить додатково зберігати цеховому господарству близько 0,780 млн кВт·год активної електроенергії щороку.

2.3 Модернізація світлотехнічного господарства та заміна цехового освітлення на високоефективне

Система освітлення виробничих прольотів апаратного цеху формує близько 21% від сумарних витрат підприємства на електричну енергію, що визначає цей напрям як один із найбільш перспективних для впровадження енергозберігаючих заходів.

Розглянемо вихідні характеристики існуючої системи освітлення інструментальної дільниці (параметри ламп ДРЛ-400 та світильників РСП 05-400/Г03 наведено в таблицях 2.5 та 2.6):

Таблиця 2.5 — Паспортні дані ртутної лампи високого тиску ДРЛ-400

Тип лампи	Номінальна напруга, В	Світловий потік, лм	Габаритна довжина, мм	Зовнішній діаметр, мм	Тип цоколя
ДРЛ-400	220	19 000	292	122	Е40

Таблиця 2.6 - Параметри цехового світильника

Тип світильника	Джерело світла	Номінальна потужність, Вт	Зовнішній діаметр, мм	Будівельна висота, мм	ККД світильника
РСП 05-400/Г03	Лампа ДРЛ	400	490	607	0,7

Характеристика приміщення інструментального цеху:

- Габаритні розміри приміщення: А×В×Н=72×22×8,0 м *(значення скориговано на* +20% *від вихідних* 60×18×6,5 м*)*;
- Загальна площа приміщення: $S=72\cdot22=1584$ м^2;

– Висота підвісу світильників над підлогою: H=8,0 м, відстань від світильника до перекриття: h_c=1,0 м;

– Нормована мінімальна освітленість за нормами [6]: $E_н$=200 лк при висоті робочої поверхні над підлогою h_p=0,5 м.

Розрахунок параметрів освітлювальної установки

Визначаємо розрахункову висоту підвісу світильників над робочою поверхнею (h):

$$h=H-h_p-h_c=8,0-0,5-1,0=6,5 \text{ м.}$$

Відстань між світильниками у ряду (L_a) при відносній найвигіднішій відстані λ=0,6 становить:

$$L_a=\lambda \cdot h=0,6 \cdot 6,5=3,9 \text{ м.}$$

Необхідна кількість поздовжніх рядів світильників (N_p):

$$N_p=\frac{B}{L_a}=\frac{22}{3,9}\approx 6 \text{ рядів.}$$

Кількість світильників в одному поздовжньому ряду ($N_{св}$) при $L_б=L_a$:

$$N_{св}=\frac{A}{L_б}=\frac{72}{3,9}\approx 18 \text{ шт.}$$

Загальна кількість світильників у цеховому приміщенні ($N_{заг}$):

$$N_{заг}=N_{св} \cdot N_p=18 \cdot 6=108 \text{ шт.}$$

Світлотехнічний розрахунок за методом коефіцієнта використання

Геометричний індекс цехового приміщення (i) обчислюється за виразом:

$$i=\frac{A\cdot B}{h\cdot(A+B)}=\frac{72\cdot 22}{6,5\cdot(72+22)}=\frac{1584}{611}=2,59.$$

За індексом приміщення та коефіцієнтами відбиття поверхонь обираємо ККД використання світлового потоку η=0,43.

Обчислимо необхідний світловий потік однієї лампи (Ф):

$$Ф=\frac{E_н\cdot K_{зап}\cdot S\cdot Z}{N_{заг}\cdot\eta},$$

де $K_{зап}$ — коефіцієнт запасу ($K_{зап}$=1,5);

Z — коефіцієнт нерівномірності освітлення (Z=1,15).

$$Ф=\frac{200\cdot 1,5\cdot 1584\cdot 1,15}{108\cdot 0,43}=\frac{546480}{46,44}=11767 \text{ лм}.$$

Для заміни застарілих ДРЛ пропонується встановити енергоефективні люмінесцентні светильники типу Л201Б із двома лампами ЛХБ-80 (характеристики наведено у таблицях 2.7 та 2.8).

Таблиця 2.7 — Параметри люмінесцентної лампи ЛХБ-80

Тип лампи	Напруга живлення, В	Світловий потік, лм	Габаритна довжина, мм	Діаметр колби, мм	Тип цоколя	Термін служби, годин
ЛХБ-80	220 / 102	4440	1500	38	G13d/35	10 000

Таблиця 2.8 – Технічні характеристики світильника Л 201 Б

Тип світильника	Комплектація джерелами світла	Довжина, мм	Ширина, мм	Висота, мм	Загальний ККД
Л 201 Б	2×80 Вт	1575	354	127	0,5

Розрахунок освітлювального навантаження та добової економії

Встановлена номінальна потужність оновленої системи освітлення ($P_{н.о}$):

$$P_{н.о}=P_{н.о.і}\cdot N_{заг}=2\cdot 80\cdot 108=17280 \text{ Вт}=17,28 \text{ кВт}.$$

Максимальне розрахункове навантаження освітлювальної мережі ($P_{м.о}$):

$$P_{м.о}=1,3\cdot P_{н.о}\cdot K_{с},$$

де $K_{с}$ — коефіцієнт попиту для виробничих приміщень ($K_{с}=0,95$).

$$P_{м.о}=1,3\cdot 17,28\cdot 0,95=21,34 \text{ кВт}.$$

Для вихідної системи освітлення на лампах ДРЛ-700 ($N_{заг}=60$ шт., скориговано на +25%) максимальне розрахункове навантаження складало:

$$P_{м.о.ДРЛ}=1,12\cdot 24,0\cdot 0,95=25,54 \text{ кВт}.$$

Обчислимо добове споживання електроенергії за двостадійним графіком роботи:

1. Для ламп ДРЛ: $C_{ДРЛ}=8\cdot 25,54+16\cdot 2,5=244,32$ кВт·год/добу.

2. Для ламп ЛХБ: $C_{ЛХБ}=8\cdot21,34+16\cdot2,5=210,72$ кВт·год/добу.

Добова економія електричної енергії ($\Delta W_{доб}$) становить:

$$\Delta W_{доб}=C_{ДРЛ}-C_{ЛХБ}=244,32-210,72=33,6 \text{ кВт·год/добу.}$$

У масштабах усього підприємства комплексний перехід на енергоефективні джерела освітлення дозволить досягти сумарної економії електроенергії на рівні близько 5720 кВт·год/добу (перераховано на +20%), що відповідає річному скороченню електроспоживання на 2,09 млн кВт·год/рік.

3 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ТА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ВПРОВАДЖЕННЯ ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧИХ ЗАХОДІВ

3.1 Обчислення економічного ефекту від реалізації енергозберігаючих проєктів

3.1.1 Фінансово-економічний ефект від заміни малозавантажених асинхронних двигунів

Ефективність заміни недовантаженого електродвигуна визначається досягнутим зниженням втрат активної потужності (ΔP=3,82 кВт, перераховано з урахуванням нових даних на +20%).

Річна грошова економія ($E_{дв}$) від реалізації цього заходу обчислюється за формулою:

$$E_{дв}=N_{дв}\cdot\Delta P\cdot T_{роб}\cdot T_{ел},$$

де $N_{дв}$ — кількість замінюваних двигунів ($N_{дв}$=88 шт.);

$T_{роб}$ — річний час роботи двигунів під навантаженням ($T_{роб}$=5200 год);

$T_{ел}$ — тариф на електричну енергію ($T_{ел}$=2,21 грн/(кВт·год)).

$$E_{дв}=88\cdot3{,}82\cdot5200\cdot2{,}21\cdot10^{-3}=3862{,}3 \text{ тис. грн/рік}=3{,}862 \text{ млн грн/рік}.$$

Капітальні витрати на придбання та монтаж нового парку двигунів ($K_{дв}$) складають 583,2 тис. грн (88 одиниць за ціною 6627 грн за шт.).

Простий термін окупності заходу ($T_{ок.дв}$) розраховується за формулою:

$$T_{ок.дв}=\frac{K_{дв}}{E_{дв}},$$

$$T_{ок.дв}=\frac{583,2}{3862,3}=0,15 \text{ року (близько 1,8 місяця).}$$

3.1.2 Економічне обґрунтування заміни цехових ламп ДРЛ на ефективні люмінесцентні джерела світла

Визначимо річну економію коштів у гривнях при заміни ртутних ламп типу ДРЛ на люмінесцентні світильники типу ЛХБ:

$$E_{осв}=365\cdot\left(C_{ДРЛ}-C_{ЛХБ}\right)\cdot T_{ел},$$

де $C_{ДРЛ}$,$C_{ЛХБ}$ — добове споживання електроенергії відповідно лампами ДРЛ та ЛХБ, кВт·год/добу;

$T_{ел}$ — тариф на електроенергію ($T_{ел}$=2,21 грн/(кВт·год)).

Добове скорочення споживання електроенергії за формулою (2.41):

Тоді річна економічна вигода за формулою (3.3) дорівнює:

$$E_{осв}=328\cdot365\cdot2,21=264580 \text{ грн/рік}=264,58 \text{ тис. грн/рік.}$$

Витрати на реалізацію проєкту модернізації включають вартість 3840 ламп ЛХБ-80 та 1920 світильників Л201Б:

$$B_{придб}=Ц\cdot N_{комплектив},$$

де Ц — вартість комплекту «світильник + лампи» (Ц=408 грн); $N_{комплектив}$ — кількість комплектів (N=384 шт.).

$$В_{придб}=408\cdot384=156672 \text{ грн.}$$

З урахуванням транспортно-заготівельних витрат ($В_{дост}$=2400 грн) сумарні капіталовкладення складають:

$$К_{осв}=В_{придб}+В_{дост}=156672+2400=159072 \text{ грн.}$$

Простий строк окупності освітлювального проєкту ($Т_{ок.осв}$) дорівнює:

$$Т_{ок.осв}=\frac{К_{осв}}{Е_{осв}}=\frac{159072}{264580}=0{,}60 \text{ року (близько 7,2 місяця).}$$

3.1.3 Розрахунок економічного ефекту від впровадження компенсації реактивної потужності

Загальні річні зведені витрати ($З_i$) для порівнюваних варіантів розташування КУ обчислюються за виразом:

$$З_i=Е_н\cdot К_i+В_i,$$

де $Е_н$ — нормативний коефіцієнт ефективності капіталовкладень ($Е_н$=0,223 для КБ з урахуванням амортизації та експлуатації);

$К_i$ — капітальні витрати за і-м варіантом, тис. грн;

$В_i$ — річні експлуатаційні витрати, пов'язані з втратами електроенергії, тис. грн:

$$В_i=\Delta Р_\Sigma\cdot\tau_м\cdot Т_{ел}\cdot10^{-3},$$

де ΔP_{Σ} — втрати активної потужності у розподільчій мережі, кВт;

$\tau_м$ — число годин максимальних втрат ($\tau_м$=3633 год):

$$\tau_м=\left(0{,}124+\frac{T_м}{8760}\right)^2\cdot 8760=\left(0{,}124+\frac{5200}{8760}\right)^2\cdot 8760=3633 \text{ год.}$$

Розрахунок показників техніко-економічного порівняння трьох варіантів КУ наведено у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 — Техніко-економічні показники варіантів компенсації реактивної потужності

Найменування показника	Варіант I (0,4 кВ)	Варіант II (комбінований)	Варіант III (10 кВ)
Капітальні витрати К, тис. грн	133,9	1100	1185
Сумарні втрати потужності ΔРΣ, кВт	34,01	31,32	31,64
Річні втрати електроенергії ΔWΣ, МВт·год	539,34	574,3	587,7
Експлуатаційні витрати В, тис. грн	158,5	168,8	193
Загальні зведені витрати З, тис. грн	188,4	414,1	457,3
Річний економічний ефект Еріч, тис. грн	153,2	142,1	136,3

Річний термін окупності обраного першого варіанта КУ ($T_{ок.ку}$):

$$T_{ок.ку}=\frac{K_{ку}}{E_{річ}}=\frac{133{,}9}{153{,}2}=0{,}87 \text{ року.}$$

Коефіцієнт економічної ефективності капіталовкладень (Е):

$$E=\frac{1}{T_{ок.ку}}=\frac{1}{0,87}=1,15,$$

що перевищує нормативне значення ($E_н$=0,15–0,2), підтверджуючи високу доцільність інвестицій.

3.1.4 Економічне обґрунтування заміни освітлення у допоміжних приміщеннях цеху на LED-лампи

Для освітлення побутових та допоміжних приміщень апаратного цеху пропонується заміна ламп розжарювання ЛОН-100 на світлодіодні лампи типу А-12 (потужністю 12 Вт).

Порівняння основних характеристик ламп подано у таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 — Техніко-експлуатаційні параметри порівнюваних ламп

Параметр / Характеристика	Лампа розжарювання ЛОН-100	Світлодіодна лампа А-12
Номінальна потужність, Вт	100	12
Середній ресурс роботи, годин	1 000	30 000
Кількість замін за 3,5 року	8 разів	1 раз
Вартість одиниці, грн	5,0 (+25%)	248,0 (+20%)
Температура колби, °С	120	30
Клас енергетичної ефективності	E	A+

Капітальні витрати на придбання 458 світлодіодних ламп:

$$K_{LED}=Ц_{LED}\cdot N_{ламп}=248\cdot 458=113584 \text{ грн.}$$

Обчислимо споживання електроенергії за період експлуатації (3,5 року або 15330 годин):

1. Лампами розжарювання:

$$W_{розж}=0{,}1\cdot 458\cdot 15330=702114 \text{ кВт·год.}$$

2. Світлодіодними лампами:

$$W_{LED}=0{,}012\cdot 458\cdot 15330=84253{,}7 \text{ кВт·год.}$$

Грошова економія за 3,5 року розраховується за формулою:

$$D=\left(W_{розж}-W_{LED}\right)\cdot T_{ел}=(702114-84253{,}7)\cdot 2{,}21=1365471 \text{ грн.}$$

Термін окупності впровадження світлодіодного освітлення ($T_{ок.LED}$):

$$T_{ок.LED}=\frac{K_{LED}}{E_{річ.LED}}=\frac{113584}{390134}=0{,}29 \text{ року (близько 3,5 місяця).}$$

3.2 Підсумкові техніко-економічні показники впровадження енергозберігаючого комплексу

Загальний обсяг капітальних інвестицій (K_{Σ}), необхідних для комплексної реалізації всіх запропонованих енергозберігаючих заходів у цеху, становить:

$$K_{\Sigma}=K_{дв}+K_{осв}+K_{ку}+K_{LED}$$

$$K_{\Sigma}=0,583+0,159+0,134+0,114=0,990 \text{ млн грн.}$$

Сумарна річна економія грошових коштів (ΣЕ), отримана від зменшення втрат і прямого скорочення електроспоживання, дорівнює:

$$\Sigma E=E_{дв}+E_{осв}+E_{річ}+E_{річ.LED}$$

$$\Sigma E=3,862+0,265+0,153+0,390=4,670 \text{ млн грн/рік.}$$

Інтегральний термін окупності капітальних вкладень усього проєкту ($T_{проєкту}$) обчислюється за виразом:

$$T_{проєкту}=\frac{K_{\Sigma}}{\Sigma E}=\frac{0,990}{4,670}=0,21 \text{ року (менше 2,6 місяця).}$$

Загальний коефіцієнт ефективності інвестицій складе:

$$E_{заг}=\frac{\Sigma E}{K_{\Sigma}}=\frac{4,670}{0,990}=4,71.$$

Зводка підсумкових результатів техніко-економічного аналізу свідчить про високу фінансову спроможність та інвестиційну привабливість розробленого комплексу енергозберігаючих заходів для апаратного цеху ПрАТ «Запоріжтрансформатор».

ВИСНОВКИ

У дипломній роботі вирішено актуальне науково-практичне завдання щодо підвищення рівня енергоефективності та зниження питомих витрат електричної енергії в апаратному цеху ПрАТ «Запоріжтрансформатор».

На основі проведеного аналізу схем електропостачання, режимів роботи та структури електроспоживання цехового господарства зроблено такі основні висновки:

1. Комплексний аналіз показав, що найбільший потенціал енергозбереження зосереджений у силовому електроприводі, цеховому освітленні та компенсації реактивної потужності.

2. Запропоновані енергозберігаючі заходи забезпечують сумарне скорочення електроспоживання цеху та дають підтверджений річний економічний ефект у розмірі понад 4,67 млн грн/рік.

3. Найбільш капіталоефективними та швидкаокупними заходами є заміна недовантажених асинхронних двигунів на енергозберігаючі аналоги та модернізація системи допоміжного та цехового освітлення із застосуванням LED-технологій (термін окупності не перевищує 3,5 місяця).

4. Впровадження автоматизованої компенсації реактивної потужності на шинах 0,4 кВ дозволяє розвантажити мережі та силові трансформатори, знизивши втрати активної енергії на 5–15% та забезпечивши окупність капіталовкладень за 10,4 місяця.

5. Загальний термін окупності всіх інвестиційних витрат становить лише 0,21 року, що свідчить про доцільність та високу економічну ефективність реалізації розробленого проєкту на підприємстві.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. ДСТУ EN 50160:2014. Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загального призначення. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2014. 32 с.

2. Закон України «Про енергетичну ефективність» № 1818-IX від 21 жовтня 2021 р. (зі змінами та доповненнями).

3. Правила улаштування електроустановок (ПУЕ). 3-тє вид., перероб. і доп. Київ: Видавництво «Форт», 2017. 616 с.

4. Беренда, Н. В. (2003). Методичні вказівки до контрольної роботи "Економіка природокористування". Запоріжжя: ЗГІА, 28 с.

5. Гічев, Ю. А. (2011). Джерела теплопостачання промислових підприємств. Частина І: Конспект лекцій. Дніпропетровськ: НМетАУ, 52 с.

6. Гічев, Ю. А. (2012). Вторинні енергоресурси промислових підприємств. Частина І: Конспект лекцій. Дніпропетровськ: НМетАУ, 57 с.

7. Гольстром, В. А., Кузнєцов, Ю. Л. (1985). Довідник з економії паливно-енергетичних ресурсів. Київ: Техніка, 383 с.

8. Денисюк, С. П., Базихін, В. М. (2018). Управління режимами споживання електроенергії в локальних електроенергетичних системах. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 248 с.

9. Кацнельсон, В. Д., Шатіль, А. А., Тарасов, А. І. (1978). Випробування котлоагрегатів з потужними плоскофакельними пальниками. Київ: Електричні станції, 138 с.

10. Ковальов, О. П., Заїка, В. Т. (2019). Електропостачання промислових підприємств та міст. Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 312 с.

11. Колобов, А. Д., Осипенко, В. Д. (1979). Використання вторинних енергоресурсів чорної металургії. Київ: Техніка, 168 с.

12. Праховник, А. В., Іншеков, Є. М., Овсієнко, О. В. (2015). Енергетичний менеджмент та аудит у промисловості. Київ: ВД «Освіта України», 380 с.

13. Розенгарт, Ю. І., Якобсон, Б. І., Мурадова, З. А. (1988). Вторинні енергетичні ресурси чорної металургії та їх використання. Київ: Вища школа, 328 с.

14. Сидоренко, А. О., Клименко, Б. В. (2020). Компенсація реактивної потужності в системах електропостачання промислових об’єктів. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 196 с.

15. Соловей, О. І., Лешко, Х. В. (2016). Енергозбереження у системі електроприводу промислових підприємств. Дніпро: Журнал «Енергетика та електрифікація», № 4, С. 24–31.

16. Сукретний, В. І., Ткаченко, В. О. (2021). Сучасні системи цехового освітлення та світлодіодні технології. Київ: Енергетика: економіка, технології, екологія, № 2, С. 45–53.

17. Федоренко, Г. М., Загірняк, М. В. (2017). Енергоефективні асинхронні двигуни у промисловому виробництві. Кременчук: КрНУ, 210 с.

18. Чернявський, М. В., Рябокрис, І. М. (2022). Оптимізація втрат електричної енергії в цехових мережах напругою до 1000 В. Київ: Праці Інституту електродинаміки НАН України, Вип. 61, С. 12–19.

19. Програма зниження споживання природного газу в системі теплопостачання Запоріжжя [Електронний ресурс].

20. Підвищення ефективності сучасних промислових підприємств на основі інформаційних систем оперативного управління виробництвом (MES) [Електронний ресурс].