

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет будівництва, транспорту та енергетики

Кафедра «Електротехнічні системи та енергетичний менеджмент»

“Допущено до захисту”

Зав. кафедри ЕТС та ЕМ

к.т.н., професор

_____ Петро ПЛІШКОВ

“ ____ ” _____ 2026 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
ЗА ПЕРШИМ (БАКАЛАВРСЬКИМ) РІВНЕМ
ВИЩОЇ ОСВІТИ

на тему:

«Розроблення системи електропостачання заводу з
виробництва автомобільних комплектуючих»

Виконав здобувач вищої освіти

ІІ курсу, групи ЕЕ–23мб

ОПП «Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка»

спеціальності 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»

_____ Богдан АВРАМЕНКО

« ____ » _____ 2026 р.

Керівник роботи

доцент, канд.техн.наук,

_____ Катерина ПЕТРОВА

« ____ » _____ 2026 р.

Рецензент _____

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет будівництва, транспорту та енергетики

Кафедра електротехнічних систем та енергетичного менеджменту

Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)

Галузь знань 14 «Електрична інженерія»

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Освітньо-професійна програма «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри

Петро ПЛЕСШКОВ

« » 2026 р.

**ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ
ЗА ПЕРШИМ (БАКАЛАВРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ
ОСВІТИ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ**

Авраменка Богдана Олександровича

(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема роботи Розроблення системи електропостачання заводу з виробництва автомобільних комплектуючих. Development of a power supply system for a plant producing automotive components

2. Керівник роботи Петрова Катерина Григорівна, к.т.н., доцент
(прізвище, ім'я, по-батькові, науковий ступінь, вчене звання)

3. Строк подання роботи до захисту 29.05.2026 р.

4. Мета та завдання кваліфікаційної роботи Метою роботи є проєктування надійної, безпечної та економічно доцільної системи електропостачання підприємства з виробництва автомобільних комплектуючих, що забезпечить мінімізацію втрат електроенергії та створення умов для безперебійної роботи високотехнологічного обладнання.

Завдання: 1. Електричні навантаження в системі електропостачання. 2. Картограма електричних навантажень та місце розташування центральної розподільної установки (головної знижувальної підстанції). 3. Техніко-економічне обґрунтування схем зовнішнього та внутрішнього електропостачання підприємства. 4. Компенсація реактивної потужності 5. Трансформаторні підстанції 6. Розрахунок струмів коротких замикань і вибір обладнання електроустановок та силових мереж системи електропостачання. 7. Спеціальний розділ. Висновки. Перелік посилань

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
<i>Спеціальний розділ</i>	<i>доцент Н. Гарасьова</i>		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів валіфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	<i>Електричні навантаження в системі електропостачання</i>	16.04.26	
2	<i>Картограма електричних навантажень та місце розташування центральної розподільної установки (головної знижувальної підстанції)</i>	20.04.26	
3	<i>Техніко-економічне обґрунтування схем зовнішнього та внутрішнього електропостачання підприємства</i>	27.04.26	
4	<i>Компенсація реактивної потужності</i>	04.05.26	
5	<i>Трансформаторні підстанції</i>	10.05.26	
6	<i>Розрахунок струмів коротких замикань і вибір обладнання електроустановок та силових мереж системи електропостачання</i>	15.05.26	
7	<i>Спеціальний розділ</i>	18.05.26	
8	<i>Оформлення пояснювальної записки КР</i>	25.05.26	
9	<i>Оформлення презентаційної частини КР</i>	28.05.26	

Дата видачі завдання

«13» квітня 2026 р.

Підпис керівника _____

Катерина ПЕТРОВА

Завдання прийнято до виконання

«13» квітня 2026 р.

Підпис здобувача _____

Богдан АВРАМЕНКО

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота: 77 с.; 12 рис.; 23 табл.; 11 джерел.

Авраменко Б.О. Розроблення системи електропостачання заводу з виробництва автомобільних комплектуючих. – Рукопис.

Бакалаврська робота за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» ОПП «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». – Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, 2026 рік.

Метою кваліфікаційної роботи є розробка надійної та раціональної системи електропостачання заводу з виробництва автомобільних комплектуючих, а також техніко-економічне обґрунтування комплексної стратегії енергозбереження для систем асинхронного електропривода.

У роботі розраховано електричні навантаження, спроектовано дворівневу компенсацію реактивної потужності та обґрунтовано схему живлення від власної ГЗП 35/10 кВ із вибором усього необхідного обладнання і перевіркою струмів КЗ. Спеціальну частину присвячено оптимізації відповідальних електроприводів шляхом впровадження частотних перетворювачів, схем перемикання «зірка-трикутник» та енергоефективних двигунів преміум-класу (IE3). Доведено, що комплексна реалізація цих заходів дозволяє заводу щорічно заощаджувати понад 816 тис. кВт·год електроенергії з терміном окупності інвестицій 4–5 місяців.

Ключові слова: завод автомобільних комплектуючих, енергоефективність, частотно-регульований привод, двигун IE3, система електропостачання

ABSTRACT

Qualification work: 77 p.; 12 fig.; 23 tables; 11 sources.

Avramenko B.O. Development of a power supply system for a plant producing automotive components. – Manuscript.

Bachelor's Thesis in Specialty 141 141 "Electric power engineering, electrical engineering and electromechanics", OPP "Electric power engineering, electrical engineering and electromechanics". – Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, 2026.

The purpose of this qualification work is to design a reliable and rational power supply system for an automotive components manufacturing plant, as well as to provide a technical and economic justification for a comprehensive energy-saving strategy for asynchronous electric drive systems.

The work includes electrical load calculations, the design of two-level reactive power compensation, and the substantiation of a power supply scheme from a dedicated 35/10 kV Main Step-down Substation (MSDS), including the selection of all necessary equipment and short-circuit current verification. A special section is dedicated to the optimization of critical electric drives through the implementation of variable frequency drives (VFDs), star-delta switching schemes, and IE3 Premium Efficiency motors. It is proven that the comprehensive implementation of these measures allows the plant to save over 816,000 kWh of electricity annually with an investment payback period of 4–5 months.

Keywords: automotive components plant, energy efficiency, variable frequency drive, IE3 premium efficiency motor, power supply system

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК	СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, ТЕРМІНІВ	8
ВСТУП		9
1.	Електричні навантаження в системі електропостачання.....	13
1.1.	Визначення силових електронавантажень у мережах до 1000 В	13
1.2.	Визначення освітлювальних електронавантажень	17
1.3.	Визначення електронавантажень у силових мережах вище 1000 В	20
1.4.	Графіки електричних навантажень.....	26
2.	Картограма електричних навантажень та місце розташування головної знижувальної підстанції (ГЗП)	31
3.	Техніко-економічне обґрунтування схем зовнішнього та внутрішнього електропостачання підприємства	34
3.1.	Схема приєднання та вибір напруги живлення.....	34
3.2.	Вибір напруги і схеми внутрішнього електропостачання	38
4.	Компенсація реактивної потужності.....	40
4.1.	Розрахунок балансу реактивної потужності та вибір пристроїв для її компенсації.....	40
4.2	Вибір кількості, потужності та місця розташування пристроїв компенсації реактивної потужності	40
5.	Трансформаторні підстанції	48
5.1.	Вибір кількості та потужності трансформаторів цехових трансформаторних підстанцій	48
5.2.	Компоновка та місце розташування трансформаторних підстанцій	50
6.	Розрахунок струмів коротких замикань і вибір обладнання електроустановок та силових мереж системи електропостачання	52

					КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА ЗА ПЕРШИМ (БАКАЛАВРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.	Б.Авраменко				Розроблення системи електропостачання заводу з виробництва автомобільних комплектуючих Development of a power supply system for a plant producing automotive components	Літ.	Аркуш	Аркушів
Перевір.	К. Петрова							
Н.контр.	К. Петрова					ЦНТУ гр. ЕЕ-23 мб		
Затв.	П. Плешков							

6.1. Розрахунок струмів КЗ.....	52
6.2. Вибір струмопровідних пристроїв силових мереж.....	55
6.3. Вибір електрообладнання.....	58
7. Енергоощадження та шляхи підвищення енергетичної ефективності асинхронних електроприводів підприємства.....	63
7.1. Аналіз структури електроспоживання заводу автомобільних комплектуючих	63
7.2. Впровадження частотно-регульованого привода для насосних установок	64
7.3. Оптимізація роботи конвеєрів головного складального цеху.....	66
7.4. Перехід на енергоефективні двигуни (ІЕЗ) у штампувальному цеху.....	67
7.5. Зведена оцінка загальнозаводської економічної ефективності енергоощадних заходів.....	68
ВИСНОВКИ	74
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	76

						Арк.

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, ТЕРМІНІВ

Скор. / Познач.	Розшифрування / Визначення терміна
АВР	Автоматичне включення резерву
АД	Асинхронний двигун
АЧР	Автоматичне частотне розвантаження
БСК	Батарея статичних конденсаторів
ВРП	Відкритий розподільчий пристрій
ГЗП	Головна знижувальна підстанція
ДСТУ	Державний стандарт України
КЗ	Коротке замикання
КЛ	Кабельна лінія
КРПЗ	Комплектний розподільчий пристрій закритого типу
КТП	Комплектна трансформаторна підстанція
ОПН	Обмежувач перенапруг нелінійний
ПЛ	Повітряна лінія електропередачі
ПТЕЕС	Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів
ПУЕ	Правила улаштування електроустановок
ПЧ	Перетворювач частоти
РП	Реактивна потужність
ТВП	Трансформатор власних потреб
ТП	Трансформаторна підстанція
ЦЕН	Центр електричних навантажень
ЧРП	Частотно-регульований привод
IE1, IE2, IE3	Класи енергоефективності електродвигунів (International Efficiency)
LCC	Вартість життєвого циклу обладнання (Life Cycle Costing)
I_k	Діюче значення періодичної складової струму короткого замикання
i_y	Максимальне миттєве значення струму (ударний струм) короткого замикання
$\operatorname{tg}\varphi$	Коефіцієнт реактивної потужності (тангенс кута зсуву фаз)
$\cos\varphi$	Коефіцієнт активної потужності

						Арк

ВСТУП

Дана кваліфікаційна робота присвячена розробці комплексної системи електропостачання сучасного підприємства з виготовлення автомобільних компонентів. Актуальність теми зумовлена стрімким розвитком машинобудівного сектору та впровадженням високотехнологічних автоматизованих ліній, що потребують високої якості та надійності енергозабезпечення.

В межах проєкту розраховано електричні навантаження, обрано оптимальну напругу живлення та конфігурацію мережі, проведено розрахунки для компенсації реактивної потужності та вибору захисної апаратури. Особливу увагу приділено безперервності технологічного циклу, оскільки раптові перерви в електропостачанні можуть призвести до значних економічних втрат та виходу з ладу вартісного обладнання (наприклад, термопластавтоматів чи роботизованих комплексів).

Опис виробничих підрозділів підприємства:

1. Цех термообробки металів. Призначений для покращення механічних властивостей деталей (валів, шестерень, елементів трансмісії). Основними споживачами електроенергії є електропечі опору великої потужності, установки індукційного нагріву та гартувальні агрегати. Навантаження характеризується тривалим стабільним режимом роботи.

2. Штампувальний цех. Тут відбувається виготовлення кузовних деталей та металевих кронштейнів. Енергоспоживання зосереджене на потужних кривошипно-шатунних та гідравлічних пресах. Специфіка навантаження — різкозмінний графік із високими пусковими струмами електродвигунів.

3. Цех виробництва елементів підвіски та ходової частини. Спеціалізується на виготовленні амортизаторів, важелів та стабілізаторів. Використовується комбіноване обладнання: металорізальні верстати, автоматизовані лінії зварювання та випробувальні стенди. Потребує надійного живлення для систем автоматики.

						Арк.

4. Механоскладальний цех. Здійснює фінальну обробку металевих вузлів та їх попереднє збирання. Основне обладнання — токарні, фрезерні та шліфувальні верстати з ЧПУ, які є чутливими до коливань напруги в мережі.

5. Головний складальний цех. Центральний підрозділ, де готові деталі об'єднуються у вузли (наприклад, модулі двигуна чи гальмівні системи). Електроспоживання формується конвеєрними стрічками, пневматичним інструментом та складними системами освітлення.

6. Цех зварювання автомобільних вузлів. Один із найбільш енергоємних підрозділів. Використовує контактне та дугове зварювання в середовищі захисних газів. Навантаження має імпульсний характер із низьким коефіцієнтом потужності, що потребує встановлення компенсуючих пристроїв.

7. Цех лиття пластмас під тиском. Виробляє пластикові елементи інтер'єру та екстер'єру (бампери, панелі). Ключові споживачі — термопластавтомати (ТПА), оснащені нагрівачами та потужними гідравлічними приводами. Раптова зупинка призводить до застигання пластику в системі, що є аварійною ситуацією.

8. Адміністративно-побутовий корпус. Включає офісні приміщення, конструкторське бюро та їдальню. Основними споживачами є комп'ютерна техніка, системи кондиціонування, вентиляції та внутрішнє освітлення. Відноситься до споживачів з високими вимогами до якості електроенергії.

9. Склад металопрокату та готової продукції. Забезпечує логістику сировини та зберігання виробів. Електроенергію споживають мостові та козлові крани, штабелери, а також потужні системи зовнішнього та внутрішнього освітлення.

10. Киснево-компресорна дільниця. Забезпечує завод стисненим повітрям та технічними газами. Основне навантаження створюють потужні компресорні установки з синхронними або асинхронними двигунами великої потужності, які працюють у тривалому режимі.

						Арк.

11. Цех виробництва автомобільних кабельних мереж. Спеціалізується на виготовленні джгутів проводів та електронних компонентів. Переважає навантаження від напівавтоматичних ліній нарізки, обтискання та контрольно-вимірювальних приладів.

12. Ремонтно-механічний цех. Допоміжний підрозділ для обслуговування основного парку верстатів заводу. Оснащений універсальним металообробним обладнанням та зварювальними апаратами невеликої потужності.

Опис технологічного процесу виробництва автомобільних комплектуючих

Виробничий цикл підприємства організований за принципом потокового багатосерійного виробництва з високим рівнем автоматизації. Технологічний шлях виготовлення компонентів (від сировини до готового вузла) складається з наступних послідовних стадій:

Стадія 1. Логістика та підготовка матеріалів

Процес розпочинається на складі металопрокату та готової продукції, куди надходить листова сталь, сортовий прокат та полімерна сировина. За допомогою мостових кранів та штабелерів здійснюється розвантаження та подача матеріалів на заготівельні ділянки. Металопрокат проходить очищення та попередню нарізку під розміри майбутніх штампів.

Стадія 2. Формоутворення та первинна обробка

- Металеві компоненти: У штампувальному цеху під дією потужних пресів формуються базові елементи кузова та кронштейни. Використання методів холодного та гарячого штампування дозволяє отримати деталі складної геометричної форми.

- Пластикові компоненти: У цеху лиття пластмас під тиском на термопластавтоматах (ТПА) виготовляються елементи інтер'єру та екстер'єру. Гранульована сировина плавиться та впорскується у прес-форми, де відбувається охолодження та застигання виробу.

						Арк.

Стадія 3. Виготовлення спеціалізованих систем

Паралельно з механічною обробкою, у цеху виробництва автомобільних кабельних мереж відбувається автоматизоване нарізання проводів, обтискання клем та формування джгутів електропроводки. Це критично важливий етап, оскільки сучасний автомобіль містить кілометри кабельних ліній.

Стадія 4. Технологічне зміцнення та прецизійна обробка

Сформовані металеві деталі (вали, шестерні, елементи підвіски) спрямовуються до цеху термообробки, де в електропечах опору проходять процеси гартування, відпуску або цементації. Це забезпечує необхідну зносостійкість деталей. Після цього у механоскладальному цеху на верстатах із ЧПУ проводиться фінішна обробка поверхонь для досягнення мікронної точності.

Стадія 5. Зварювання та формування вузлів

У цеху зварювання автомобільних вузлів здійснюється з'єднання штампованих та оброблених деталей. Використовується роботизоване дугове зварювання в середовищі захисних газів (аргон, CO₂), які постачаються з киснево-компресорної дільниці. Тут формуються каркаси сидінь, елементи вихлопної системи та підрамники.

Стадія 6. Кінцеве складання та випробування

У головному складальному цеху всі компоненти (пластик, кабелі, механічні вузли) збираються в єдині модулі. На спеціальних стендах проводиться контроль якості: перевірка геометрії, випробування на міцність та діагностика електронних ланцюгів. Готова продукція маркується та відвантажується на склад.

Безперервність процесу підтримується киснево-компресорною дільницею (стиснене повітря для пневматики) та ремонтно-механічним цехом, який забезпечує постійну працездатність верстатного парку. Керівництво процесами та інженерне проєктування здійснюється в адміністративно-побутовому корпусі.

						Арк.

Метою кваліфікаційної роботи є проектування надійної, безпечної та економічно доцільної системи електропостачання підприємства автомобільної галузі, що гарантує мінімізацію втрат електроенергії та створення умов для безперебійної роботи високотехнологічного обладнання.

Результати проведених досліджень та інженерних розрахунків можуть бути успішно застосовані під час реального проектування, модернізації чи реконструкції систем електропостачання підприємств машинобудівного сектору з високим рівнем автоматизації виробництва.

						Арк.

1. ЕЛЕКТРИЧНІ НАВАНТАЖЕННЯ В СИСТЕМІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

1.1. Визначення силових електронавантажень у мережах до 1000 В

Розрахунок електричних навантажень (ЕН) для споживачів напругою до 1 кВ виконано за загальноприйнятим методом впорядкованих діаграм (методом коефіцієнта максимуму) [2], який забезпечує найвищу точність для промислових підприємств із різноманітним технологічним обладнанням.

Як приклад, наведемо детальний алгоритм обчислення параметрів для одного з найбільш енергоємних підрозділів заводу з виготовлення автомобільних комплектуючих — *цеху термообробки металів*.

Вихідні дані для розрахунку обраного цеху (згідно з технологічним завданням):

- Загальна к-ть одиниць встановленого обладнання: $n = 100$ шт.;
- Мінімальна та максимальна потужність одиничного приймача:

$$P_{min} = 5,1 \text{ кВт}, P_{max} = 107 \text{ кВт};$$

- Сумарна встановлена (номінальна) потужність: $\sum P_H = 4263,00 \text{ кВт};$
- Довідковий коефіцієнт використання для даної групи приймачів:

$$K_u = 0,58;$$

- Паспортний коефіцієнт потужності: $\cos \varphi = 0,65$ (відповідно $\operatorname{tg} \varphi = 1,17$).

На першому етапі визначаємо середньозмінні значення активного та реактивного навантаження цеху:

$$P_{cm} = K_u \cdot \sum P_H = 0,58 \cdot 4263,00 = 2456,30 \text{ кВт}$$

$$Q_{cm} = P_{cm} \cdot \operatorname{tg} \varphi = 2456,30 \cdot 1,17 \approx 2873,97 \text{ кВар}$$

Наступним кроком є визначення ефективного числа електроприймачів (n_e). Оскільки приймачі різняться за потужністю (від 5,1 до 107 кВт), n_e обчислюється за формулою:

						Арк.

$$n_e = \frac{(\sum P_H)^2}{\sum (P_H^2)}$$

Враховуючи розподіл потужностей у цеху, розрахункове ефективне число електроприймачів становить $n_e = 54$.

Знаючи ефективне число приймачів ($n_e = 54$) та коефіцієнт використання ($K_u = 0,58$), за довідковими кривими (або таблицями) визначаємо коефіцієнт максимуму навантаження:

$$K_M = 1,15$$

Маючи всі необхідні коефіцієнти, обчислюємо підсумкові розрахункові навантаження для Цеху термообробки металів:

- Розрахункова активна потужність:

$$P_p = P_{cm} \cdot K_M = 2456,30 \cdot 1,15 = 2824,74 \text{ кВт}$$

- Розрахункова реактивна потужність (оскільки $n_e > 10$, приймаємо $Q_p \approx Q_{cm}$): $Q_p = 959,18 \text{ кВар}$

- Повна розрахункова потужність:

$$S_p = \sqrt{P_p^2 + Q_p^2} = \sqrt{2824,74^2 + 959,18^2} = 2984,10 \text{ кВА}$$

Аналогічний алгоритм обчислень із застосуванням відповідних довідкових коефіцієнтів та фактичної кількості обладнання було застосовано до всіх інших виробничих та допоміжних підрозділів заводу. Повний зведений розрахунок ел.нав. мережі напр.0,4 кВ представлено у Таблиці 1.1.

						Арк.

Таблиця 1.1. Таблиця проєктних електричних навантажень на стороні низької напруги

№	Назва підрозділу	Кіл-ть ЕП	P _{min} , кВт	P _{max} , кВт	P_{Σ}	K_B	$\cos \varphi$	$\operatorname{tg} \varphi$	$P_{\text{см}}$, кВт	$Q_{\text{см}}$, квар	n_E	K_M	P_p , кВт	Q_p , квар	S_p , кВА
1	Цех термообробки металів	100	5,1	107	4263	0,58	0,65	1,17	2456,3	959,18	54	1,15	2824,74	959,18	2984,1
2	Штампувальний цех	49	5,1	51	1969	0,27	0,65	1,17	532	622	49	1,26	671	622	915
3	Цех виробництва елементів підвіски	117	10,2	102	4517	0,31	0,88	0,54	1400	756	89	1,17	1638	756	1804
4	Механоскладальний цех	38	10,2	102	1278	0,29	1,02	1,22	371	453	25	1,36	506	453	679
5	Головний складальний цех	35	7,6	55	2546	0,26	0,67	1,11	662	734	35	1,33	878	734	1144
6	Цех зварювання автовузлів	33	5,1	76	1066	0,40	0,60	1,33	426	568	28	1,26	537	568	782
7	Цех лиття пластмас під тиском	21	5,1	51	457	0,34	0,70	1,02	155	158	18	1,39	216	158	268
8	Адміністративно-побутовий корпус	78	30,5	51	203	0,70	0,90	0,48	142	69	78	1,00	142	69	158
9	Склад металопрокату	17	5,1	10	122	0,10	0,50	1,73	12	21	17	1,90	23	21	31
10	Киснево-компресорна дільниця	12	1,1	81	406	0,67	0,80	0,75	272	204	10	1,00	272	204	340
11	Цех виробництва авто- кабельних мереж	18	1,1	20	571	0,31	0,70	1,02	177	181	18	1,42	251	181	310
12	Ремонтно-механічний цех	44	5,1	41	870	0,27	0,70	1,02	235	240	42	1,29	302	240	386
	Всього по заводу з виробництва АК	562	1,1	107	18268	0,38	0,71	1,01	6857	6896	341	1,00	6857	6896	9725

1.2. Визначення освітлювальних електронавантажень

Визначення електричних навантажень систем штучного освітлення виробничих та допоміжних приміщень заводу виконано за методом питомої потужності. Цей підхід базується на врахуванні площі кожного підрозділу та нормативного значення питомої потужності, яке обирається залежно від характеру зорових робіт і типу застосованих джерел світла (у нашому проєкті передбачено використання сучасних енергоефективних LED-світильників).

Для демонстрації алгоритму обчислень наведемо покроковий розрахунок освітлювального навантаження для *цеху термообробки металів*.

Вихідні параметри для даного підрозділу:

- Загальна площа приміщення: $F = 16985 \text{ м}^2$;
- Нормативна питома потужність освітлення: $p_0 = 12 \text{ Вт} / \text{м}^2$;
- Коефіцієнт попиту для освітлювальних мереж даного типу: $K_C = 0,95$;
- Коефіцієнт потужності світильників: $\cos \varphi = 0,9$ (відповідно $\text{tg} \varphi = 0,48$).

Крок 1. Визначаємо встановлену (номінальну) активну потужність освітлювальної установки цеху:

$$P_y = \frac{p_0 \cdot F}{1000} = \frac{12 \cdot 16985}{1000} = 203,82 \approx 203,8 \text{ кВт}$$

Крок 2. Обчислюємо встановлену реактивну потужність системи освітлення:

$$Q_y = P_y \cdot \text{tg} \varphi = 203,82 \cdot 0,48 = 97,83 \approx 97,8 \text{ квар}$$

Крок 3. Знаходимо розрахункову активну потужність з урахуванням коефіцієнта попиту:

$$P_p = P_y \cdot K_C = 203,82 \cdot 0,95 = 193,63 \approx 193,6 \text{ кВт}$$

Крок 4. Знаходимо розрахункову реактивну потужність:

$$Q_p = Q_y \cdot K_C = 97,83 \cdot 0,95 = 92,94 \approx 92,9 \text{ квар}$$

Крок 5. Визначаємо повну розрахункову потужність освітлювальної мережі цеху:

						Арк.

$$S_p = \sqrt{P_p^2 + Q_p^2} = \sqrt{193,63^2 + 92,94^2} = 214,77 \approx 214,8 \text{ кВА}$$

Аналогічна методика обчислень була застосована до всіх інших цехів, адміністративних будівель, а також для розрахунку зовнішнього освітлення території автомобільного заводу. Всі підсумкові значення струмоприймачів освітлювальної мережі зведено до єдиної відомості.

У таблиці 1.2 представлені результати проектування та розрахунку освітлювальних навантажень об'єкта досліджень.

						Арк.

Таблиця 1.2. Проектні навантаження освітлювальних установок по цехах підприємства

№	Найменування	F , м ²	ρ_0 , Вт/м ²	P_B , кВт	Q_B , квар	K_c	$\cos \varphi$	$tg \varphi$	P_P , кВт	Q_P , квар	S_P , ВА
1	Цех термообробки металів	16985	12	203,8	97,8	0,95	0,9	0,48	193,6	92,9	214,8
2	Штампувальний цех	21 241	12	254,89	123,4	0,95	0,90	0,48	271,21	131,4	301,3
3	Цех виробництва елементів підвіски	39 520	12	474,24	229,7	0,95	0,90	0,48	504,59	244,4	560,7
4	Механоскладальний цех	34 698	12	416,38	201,7	0,95	0,90	0,48	443,02	214,6	492,2
5	Головний складальний цех	1 730	15	25,95	12,6	0,95	0,90	0,48	27,61	13,4	30,7
6	Цех зварювання автовузлів	21 017	15	315,26	152,7	0,95	0,90	0,48	335,43	162,5	372,7
7	Цех лиття пластмас під тиском	3 207	12	38,48	18,6	0,95	0,90	0,48	40,95	19,8	45,5
8	Адміністративн о-побутовий корпус	10 038	20	200,76	97,2	0,80	0,90	0,48	192,73	93,3	214,1
9	Склад металопрокату	15 281	4	61,12	0,0	0,60	1,00	0,00	36,67	0,0	36,7
10	Киснево-компресорна дільниця	530	10	5,30	2,6	0,80	0,90	0,48	4,75	2,3	5,3
11	Цех виробництва авто-кабельних мереж	17 505	15	262,58	127,2	0,95	0,90	0,48	279,38	135,3	310,4
12	Ремонтно-механічний цех	10 271	12	123,25	59,7	0,95	0,90	0,48	131,14	63,5	145,7
	Освітлення території	1 191 321	0,15	178,70	0,0	0,60	1,00	0,00	120,09	0,0	120,1
	Всього			2 561	1 124				2 604	1 185	2 876

											Арк.

1.3. Визначення електронавантажень у силових мережах вище 1000 В

Перехід до розрахунку електричних навантажень на стороні високої напруги (понад 1 кВ) передбачає визначення розрахункових параметрів безпосередньо на шинах 10 кВ цехових трансформаторних підстанцій (ТП). Цей етап вимагає попереднього вибору кількості ТП, номінальної потужності силових трансформаторів та їх оптимального розміщення на генеральному плані підприємства.

Вибір конфігурації підстанцій здійснюється на основі аналізу картограми електричних навантажень. Споживачі групуються таким чином, щоб мінімізувати довжину низьковольтних мереж (до 0,4 кВ).

Методика обчислення навантажень на рівні вище 1000 В включає наступні кроки:

1. Підсумовування активних та реактивних потужностей усіх вузлів навантаження (силових та освітлювальних), підключених до шин 0,4 кВ конкретної ТП.

2. Визначення повного розрахункового навантаження підстанції та обчислення фактичного коефіцієнта завантаження трансформаторів (K_3).

3. Розрахунок втрат активної (ΔP_T) та реактивної (ΔQ_T) потужності в силових трансформаторах.

4. Додавання отриманих втрат до навантажень на стороні 0,4 кВ для знаходження сумарного навантаження на шинах 10 кВ.

Розглянемо приклад розрахунку для ТП №6 (механоскладальний цех, склад металопрокату, ремонтно-механічний цех).

До встановлення прийнято двотрансформаторну підстанцію типу

$2 \times TM-1000/10/0,4$ $n = 2, S_{НОМ} = 1000$ кВА.

Сумарне розрахункове навантаження на шинах 0,4 кВ для ТП №6 становить:

						Арк.

- Активна потужність: $P_{0,4} = 1399 \text{ кВт}$;
- Реактивна потужність: $Q_{0,4} = 992 \text{ квар}$;
- Повна потужність: $S_{0,4} = \sqrt{1399^2 + 992^2} = 1715 \text{ кВА}$.

Дійсний коефіцієнт завантаження трансформаторів складе:

$$K_3 = \frac{S_{0,4}}{n \cdot S_{НОМ}} = \frac{1715,0}{21000} = 0,857$$

Підставивши каталожні дані трансформатора ТМ-1000 у формули втрат, отримуємо:

$$\Delta P_T = 24 \text{ кВт}; \Delta Q_T = 117,1 \text{ квар}$$

Тоді загальне розрахункове навантаження ТП №6 на шинах 10 кВ визначається як сума навантаження сторони 0,4 кВ та втрат:

$$P_{10} = P_{0,4} + \Delta P_T = 1399,0 + 24,0 = 1423,0 \text{ кВт}$$

$$Q_{10} = Q_{0,4} + \Delta Q_T = 992,0 + 117,1 = 1109,1 \text{ квар}$$

Аналогічним чином проведено обчислення для всіх інших цехових підстанцій підприємства (ТП №1–8). Після знаходження навантажень для кожної ТП, визначається сумарне навантаження всього підприємства на стороні високої напруги (з урахуванням збігу максимумів навантаження).

Зведені та подані у вигляді таблиці 1.3. узагальнені результати розрахунків електричних навантажень у мережі вище 1000 В.

						Арк.

Таблиця 1.3. Зведена відомість електричних навантажень на стороні високої напруги

№	Назва групи споживачів	Кількість ЕС	Р одного			P_{Σ}	m	K_B	$\cos \varphi$	$tg \varphi$	Середнє		n_E	K_M	Розрахункове навантаження		
			min	...	max						$P_{CM},$ кВт	$Q_{CM},$ квар			$P_P,$ кВт	$Q_P,$ квар	$S_P,$ кВА
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	
ТП №1,2,3 (6x1000)																	
1	Цех термооб.металів																
	Силове навантаження	100	5,1	...	107	4263	20,98	0,58	0,65	1,17	2472,54	2890,72	79,68	1,09	2697,5	2890,7	3953,8
	Освітлювальне навантаження										203,8	98,7			216,9	105,0	241,0
	Всього										2676,4	2989,4			2914,4	2995,8	4179,5
2	Цех лиття пластмас під тиском																
	Силове навантаження	21	5,1	...	51	456,75	10	0,34	0,7	1,02	155,295	158,4326	17,91	1,39	215,7	158,4	267,6
	Освітлювальне навантаження										38,5	18,6			279,4	135,3	310,4
	Всього										193,8	177,1			495,1	293,7	575,6
3	Адміністративно-побутовий корпус																
	Силове навантаження	78	30,5	...	51	203	1,672	0,7	0,9	0,48	142,1	68,82217	78	1	142,1	68,8	157,9
	Освітлювальне навантаження										200,8	97,2			192,7	93,3	214,1
	Всього										342,9	166,1			334,8	162,2	372,0
Всього силова по ТП 1,2,3		199	5,1	...	107	4923	21	0,56	0,66	1,13	2769,9	3118,0	92	1,09	3014,3	3118,0	4336,8
Всього освіт.по ТП 1,2,3											443,1	214,6			689,0	333,7	765,5
Всього на 0,4 кВ											3213,0	3332,6			3703,2	3451,7	5062,4
Втрати в тр-рах ТП 1,2,3															65,5	328,1	334,5

Продовження Таблиця 1.3.

2		3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Всього на шинах 10 кВ по ТП 1,2,3														3768,7	3779,7	5337,6
ТП №4,5 (4х1000)																
1	Штампувальний цех															
	Силове навантаження	49	5,1	...	51	1969,1	10	0,27	0,65	1,17	531,657	621,5759	49	1,26	671,5	915,0
	Освітлювальне навантаження										254,9	123,4			271,2	301,3
	Всього										786,5	745,0			942,7	1206,4
2	Цех виробництва елементів підвіски															
	Силове навантаження	117	10,2	...	102	4516,75	10	0,31	0,88	0,54	1400,193	755,7439	88,56	1,17	1638,0	1804,0
	Освітлювальне навантаження										474,2	229,7			504,6	560,7
	Всього по цеху										1874,4	985,4			2142,6	2364,5
Всього силова по ТП 4,5		166	5,1	...	102	6486	20	0,30	0,81	0,71	1931,8	1377,3	127	1,14	2208,9	2603,1
Всього освітлювальна по ТП 4,5											729,1	353,1			775,8	862,0
Всього на шинах 0,4 кВ по ТП 4,5											2661,0	1730,5			2984,7	3461,4
Втрати в тр-рах ТП 4,5															47,9	239,1
Всього на шинах 10 кВ по ТП 4,5															3032,6	3625,7

Продовження Таблиця 1.3.

ТП №6 (2х1000)																	
1	Механоскладальний цех																
	Силове навантаження	38	10,2	...	102	1277,75	10	0,29	1,02	1,22	370,5475	453,1078	25,05	1,36	505,5	453,1	678,9
	Освітлювальне навантаження										416,4	201,7			443,0	214,6	492,2
	Всього										786,9	654,8			948,6	667,7	1160,0
2	Склад металопрокату																
	Силове навантаження	17	5,1	...	10	121,8	1,961	0,1	0,5	1,73	12,18	21,09638	17	1,9	23,2	21,1	31,3
	Освітлювальне навантаження										61,1	0,0			36,7	0,0	36,7
	Всього										73,3	21,1			59,9	21,1	63,5
3	Ремонтно-механічний цех																
	Силове навантаження	44	5,1	...	41	870,25	8,039	0,27	0,7	1,02	234,9675	239,7148	42,45	1,29	301,9	239,7	385,5
	Освітлювальне навантаження										123,3	59,7			131,1	63,5	145,7
	Всього										358,2	299,4			433,1	303,2	528,7
Всього силова по ТП 6		99	5,1	...	102	2270	20	0,27	0,65	1,16	617,7	713,9	45	1,28	788,1	713,9	1063,4
Всього освітлювальна по ТП 6											600,8	261,4			610,8	278,1	671,2
Всього на шинах 0,4 кВ по ТП 6											1218,4	975,3			1399,0	992,0	1715,0
Втрати в тр-рах ТП 6															24,0	117,1	119,5
Всього на шинах 10 кВ по ТП 6															1422,9	1109,1	1804,1
ТП №7 (2х1000)																	
1	Цех виробництва авто-кабельних мереж																
	Силове навантаження	18	1,1	...	20	571,44	18,18	0,31	0,7	1,02	177,1464	180,7255	18	1,42	251,3	180,7	309,5
	Освітлювальне навантаження										474,2	229,7			279,4	135,3	310,4
	Всього										651,4	410,4			530,6	316,0	617,6
2	Цех зварювання автовузлів																
	Силове навантаження	33	5,1	...	76	1065,75	14,9	0,4	0,6	1,33	426,3	568,4	28,05	1,26	536,8	568,4	781,8
	Освітлювальне навантаження										315,3	152,7			335,4	162,5	372,7
	Всього										741,6	721,1			872,3	730,9	1138,0

Продовження Таблиця 1.3.

Всього силова по ТП 7		51	1	...	76	1637	69	0,37	0,63	1,24	603	749	43	1,22	735,9	749,1	1050,1
Всього освітлювальна по ТП 7											789	382			614,8	297,8	683,1
Всього на шинах 0,4 кВ по ТП 7											1392,9	1131,5			1350,7	1046,9	1708,9
Втрати в тр. ТП 7															19,0	99,4	101,2
Всього на шинах 10 кВ по ТП 7															1369,7	1146,3	1786,1
ТП № 8 (2х1000)																	
1	Киснево-компресорна дільниця																
	Силове навантаження	12	1,1	...	81	406	73,64	0,67	0,8	0,75	272,02	204,015	10,02	1	272,0	204,0	340,0
	Освітлювальне навантаження										5,3	2,6			4,7	2,3	5,3
	Всього										277,3	206,6			276,8	206,3	345,2
2	Головний складальний цех																
	Силове навантаження	35	7,6	...	55	2546,2	7,237	0,26	0,67	1,11	662,012	733,5104	35	1,33	878,4	733,5	1144,4
	Освітлювальне навантаження										26,0	12,6			27,6	13,4	30,7
	Всього										688,0	746,1			906,0	746,9	1174,2
Всього силова по ТП 8		47	1,1	...	81	2952	74	0,32	0,71	1,00	934,0	937,5	47	1,24	1156,4	937,5	1488,7
Всього освітлювальна по ТП 8											31,3	15,1			32,4	15,7	36,0
Всього на шинах 0,4 кВ по ТП 8											965,3	952,7			1188,8	953,2	1523,7
Втрати в тр. ТП 8															25,9	134,9	137,4
Всього на шинах 10 кВ по ТП 8															1214,7	1088,1	1630,8
Всього по заводу на стороні 0,4 кВ															6857,0	6895,9	9724,8
Загальні втрати в тр-рах ТП 1-10															182,3	913,7	931,8
Всього по заводу на стороні 10 кВ															7039,3	7809,6	10513,9
Всього по заводу															7039,3	7809,6	10513,9

1.4. Графіки електричних навантажень

Основою для глибокого аналізу режимів електроспоживання заводу з виготовлення автомобільних комплектуючих є добові графіки активної $P(t)$, реактивної $Q(t)$ та повної $S(t)$ потужностей. Ці графіки формуються на базі типових вимірювань для характерних зимових та літніх діб, з обов'язковим поділом на робочі та вихідні дні.

Аналіз добових коливань дозволяє оцінити реальну навантажувальну здатність цехових трансформаторів та виявити абсолютні максимуми і мінімуми споживання, що є критично важливим для подальшого розрахунку втрат та рівнів напруги в розподільчій мережі. На основі добових графіків будується впорядкований річний графік за тривалістю.

За допомогою річного графіка визначаються ключові техніко-економічні показники системи електропостачання: загальні річні обсяги спожитої активної та реактивної енергії, середньозважений коефіцієнт потужності, число годин використання максимуму навантаження (T_{max}) та еквівалентний час максимальних втрат (τ).

Таблиця 1.4. Погодинний профіль електроспоживання заводу автокомплектуючих

Година	Зимові робочі дні		Зимові вихідні дні		Літні робочі дні		Літні вихідні дні	
	P, %	Q, %	P, %	Q, %	P, %	Q, %	P, %	Q, %
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	25	25	15	20	20	20	10	15
2	25	25	15	20	20	20	10	15
3	25	25	15	20	20	20	10	15
4	25	25	15	20	20	20	10	15
5	25	25	15	20	20	20	10	15
6	30	30	15	20	25	25	10	15
7	40	40	20	25	35	35	15	20
8	60	60	20	25	55	55	15	20
9	80	80	25	30	75	75	20	25
10	95	95	25	30	90	90	20	25

									Арк.

Продовження табл. 1.4

1	2	3	4	5	6	7	8	9
11	100	100	25	30	95	95	20	25
12	80	80	25	30	75	75	20	25
13	50	50	20	25	45	45	15	20
14	50	50	20	25	45	45	15	20
15	65	65	20	25	60	60	15	20
16	75	75	25	30	70	70	20	25
17	85	85	25	30	80	80	20	25
18	95	95	25	30	90	90	20	25
19	80	80	25	30	75	75	20	25
20	70	70	20	25	65	65	15	20
21	50	50	20	25	45	45	15	20
22	40	40	15	20	35	35	10	15
23	30	30	15	20	25	25	10	15
24	25	25	15	20	20	20	10	15

Таблиця 1.5. Погодинна відомість споживання активної та реактивної потужності

Година	Зимові робочі дні		Зимові вихідні дні		Літні робочі дні		Літні вихідні дні	
	Р, кВт	Q, квар	Р, кВт	Q, квар	Р, кВт	Q, квар	Р, кВт	Q, квар
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1759,8	1952,4	1055,9	1561,9	1407,9	1561,9	703,9	1171,4
2	1759,8	1952,4	1055,9	1561,9	1407,9	1561,9	703,9	1171,4
3	1759,8	1952,4	1055,9	1561,9	1407,9	1561,9	703,9	1171,4
4	1759,8	1952,4	1055,9	1561,9	1407,9	1561,9	703,9	1171,4
5	1759,8	1952,4	1055,9	1561,9	1407,9	1561,9	703,9	1171,4
6	2111,8	2342,9	1055,9	1561,9	1759,8	1952,4	703,9	1171,4
7	2815,7	3123,8	1407,9	1952,4	2463,8	2733,4	1055,9	1561,9
8	4223,6	4685,8	1407,9	1952,4	3871,6	4295,3	1055,9	1561,9
9	5631,4	6247,7	1759,8	2342,9	5279,5	5857,2	1407,9	1952,4
10	6687,3	7419,1	1759,8	2342,9	6335,4	7028,6	1407,9	1952,4
11	7039,3	7809,6	1759,8	2342,9	6687,3	7419,1	1407,9	1952,4
12	5631,4	6247,7	1759,8	2342,9	5279,5	5857,2	1407,9	1952,4
13	3519,7	3904,8	1407,9	1952,4	3167,7	3514,3	1055,9	1561,9

Арк.

1	2	3	4	5	6	7	8	9
14	3519,7	3904,8	1407,9	1952,4	3167,7	3514,3	1055,9	1561,9
15	4575,5	5076,2	1407,9	1952,4	4223,6	4685,8	1055,9	1561,9
16	5279,5	5857,2	1759,8	2342,9	4927,5	5466,7	1407,9	1952,4
17	5983,4	6638,2	1759,8	2342,9	5631,4	6247,7	1407,9	1952,4
18	6687,3	7419,1	1759,8	2342,9	6335,4	7028,6	1407,9	1952,4
19	5631,4	6247,7	1759,8	2342,9	5279,5	5857,2	1407,9	1952,4
20	4927,5	5466,7	1407,9	1952,4	4575,5	5076,2	1055,9	1561,9
21	3519,7	3904,8	1407,9	1952,4	3167,7	3514,3	1055,9	1561,9
22	2815,7	3123,8	1055,9	1561,9	2463,8	2733,4	703,9	1171,4
23	2111,8	2342,9	1055,9	1561,9	1759,8	1952,4	703,9	1171,4
24	1759,8	1952,4	1055,9	1561,9	1407,9	1561,9	703,9	1171,4

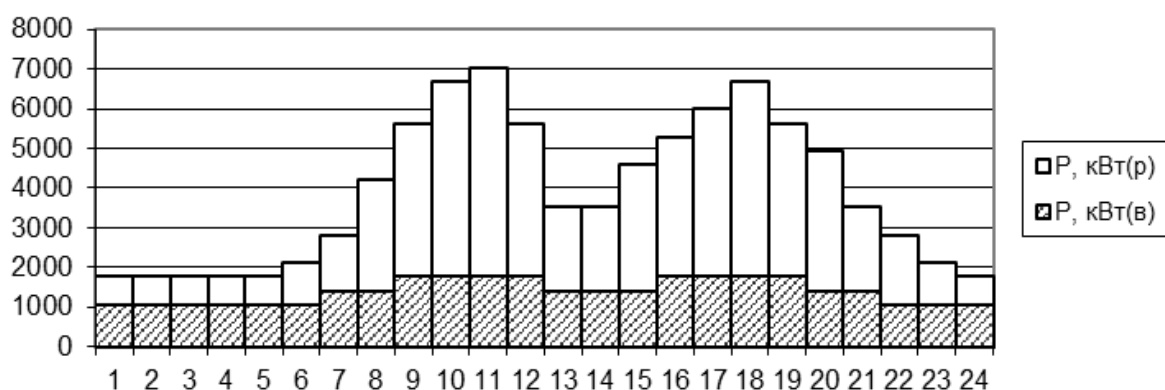


Рисунок 1.1. Хронограма добового споживання активної електричної енергії
(зимовий період)

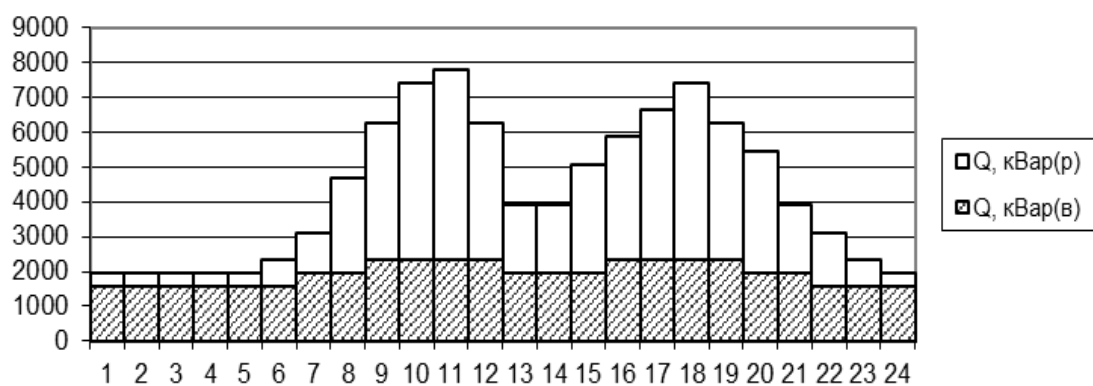


Рисунок 1.2. Графік добового розподілу реактивної потужності об'єкта
проектування (зимовий період)

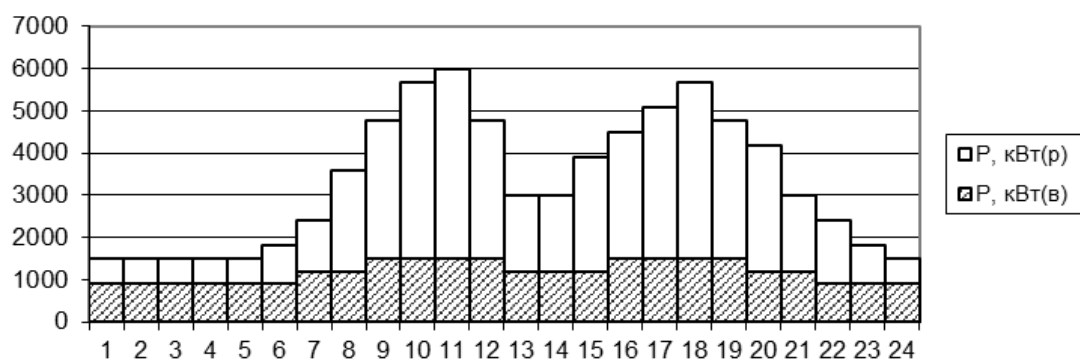


Рисунок 1.3. Хронограма добового споживання активної електричної енергії (літній період)

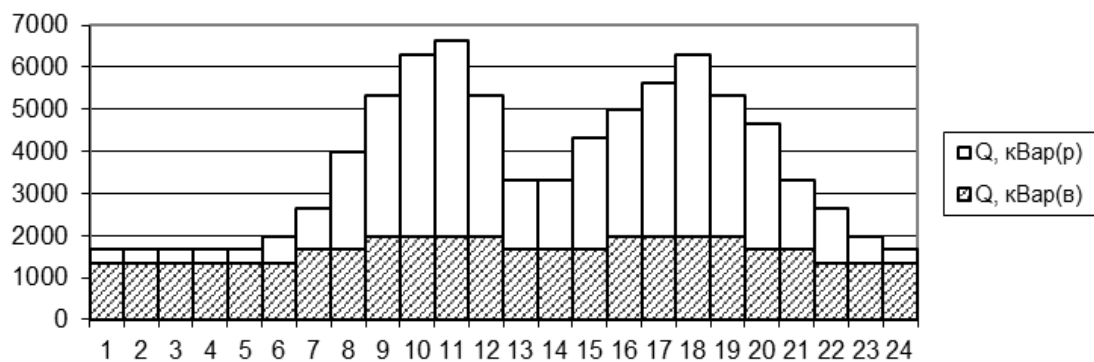


Рисунок 1.4. Графік добового розподілу реактивної потужності об'єкта проектування (літній період)



Рисунок 1.5. Інтегральний графік річного споживання повної електричної потужності заводу

Підсумкові річні показники:

Річний обсяг спожитої активної енергії:

$$W_a = 13,68 + 8,30 + 1,96 + 1,23 = 25170000 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

Річний обсяг спожитої реактивної енергії:

$$W_r = 12,51 + 7,60 + 4,24 + 2,66 = 27010000 \text{ кВар} \cdot \text{год}$$

Еквівалентний час використання максимального навантаження:

$$T_{max} = \frac{25170000}{7039,3} = 3575 \text{ год}$$

Еквівалентний час найбільших втрат потужності:

$$\tau = \left(0,124 + \frac{3575}{10000} \right)^2 \cdot 8760 = (0,4815)^2 \cdot 8760 = 2031 \text{ год}$$

						Арк.

2. КАРТОГРАМА ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ ТА МІСЦЕ РОЗТАШУВАННЯ ГОЛОВНОЇ ЗНИЖУВАЛЬНОЇ ПІДСТАНЦІЇ (ГЗП)

З метою візуалізації просторового розподілу споживання електроенергії на території заводу з виготовлення автомобільних комплектуючих та визначення найбільш раціонального місця для спорудження головної знижувальної підстанції (ГЗП), розробляється картограма електричних навантажень. На генплані об'єкта кожен виробничий підрозділ позначається колом, площа якого строго пропорційна величині його розрахункової активної потужності.

Для демонстрації методики розрахунку геометричних параметрів картограми візьмемо найбільш енергоємний підрозділ підприємства — *цех термообробки металів*.

Загальне розрахункове активне навантаження цього об'єкта становить $P_p = 2914,35$ кВт. Радіус відповідного кола розраховується за формулою площі круга, виходячи з прийнятого масштабу питомої потужності (для зручності побудови приймаємо $m = 0,5$ кВт/мм²):

$$R = \sqrt{\frac{P_p}{\pi \cdot m}} = \sqrt{\frac{2914,35}{3,14 \cdot 0,5}} = 43,07 \text{ мм}$$

Освітлювальне навантаження є невід'ємною частиною загального електроспоживання цеху ($P_{p.осв} = 216,86$ кВт), графічно воно відображається як окремий сектор у межах побудованого кола. Центральний кут даного сектора (α) прямо пропорційний питомій вазі освітлення в сумарному навантаженні:

$$\alpha = 360^\circ \cdot \frac{P_{p.осв}}{P_p} = 360^\circ \cdot \frac{216,86}{2914,35} = 26,79^\circ$$

Аналогічним чином проведено обчислення геометричних параметрів для решти виробничих і допоміжних підрозділів заводу. Усі отримані дані зведено до Таблиці 2.1.

З метою мінімізації капіталовкладень у кабельну продукцію та зменшення технічних втрат у розподільчих мережах, джерело живлення слід проектувати у точці, що максимально наближена до центру електричних навантажень (ЦЕН).

						Арк.

Пошук цієї точки базується на законах теоретичної механіки для обчислення центру тяжіння плоскої системи матеріальних точок. Тут «масами» виступають розрахункові потужності об'єктів, а «плечима» — координати їх розташування на генеральному плані (X_i, Y_i).

Обчислення координат оптимального розташування підстанції ($X_{ЦЕН}, Y_{ЦЕН}$) здійснюється за наступними виразами:

$$X_{ЦЕН} = \frac{\sum (P_{pi} \cdot X_i)}{\sum P_{pi}} = \frac{2157725,46}{10618,20} = 203,2 \text{ м}$$

$$Y_{ЦЕН} = \frac{\sum (P_{pi} \cdot Y_i)}{\sum P_{pi}} = \frac{4765727,81}{10618,20} = 448,8 \text{ м}$$

Знайдені географічні координати ($X_{ЦЕН} = 203,2 \text{ м}$; $Y_{ЦЕН} = 448,8 \text{ м}$) відмічаються на генеральному плані і слугують теоретично найкращою позицією для введення електроенергії на підприємство. На практиці остаточне рішення щодо місця спорудження ГЗП (або ЦРП) приймається із незначним зміщенням від розрахованого ЦЕН, зважаючи на існуючу забудову, логістичні маршрути, наявність підземних комунікацій та санітарно-пожежні вимоги.

						Арк.

Таблиця 2.1. Топологічні та енергетичні показники структурних підрозділів підприємства для побудови картограми

№	Найменування										
по		$P_{P_{\text{сил}}}$	$P_{P_{\text{осв}}}$	P_r	m	R , см	a	x , м	y , м	P^*x , кВт м	P^*y , кВт м
плану		кВт	кВт	кВт							
1	Цех термообробки металів	2697,49	216,86	2914,35	0,5	43,07	26,79	135	300	393437	874305
2	Штампувальний цех	671,45	271,21	942,66	0,5	24,50	103,57	45	660	42420	622155
3	Цех виробництва елементів підвіски	1638,02	504,59	2142,61	0,5	36,93	84,78	54	390	115701	835618
4	Механоскладальний цех	505,53	443,02	948,55	0,5	24,57	168,14	156	510	147974	483762
5	Головний складальний цех	878,37	27,61	905,98	0,5	24,02	10,97	495	570	448459	516407
6	Цех зварювання автовузлів	536,83	335,43	872,26	0,5	23,56	138,44	420	510	366350	444853
7	Цех лиття пластмас під тиском	215,68	40,95	256,63	0,5	12,78	57,44	330	300	84688	76989
8	Адміністративно-побутовий корпус	142,10	192,73	334,83	0,5	14,60	207,22	156	45	52233	15067
9	Склад металопрокату	23,18	36,67	59,86	0,5	6,17	220,57	240	540	14366	32323
10	Киснево-компресорна діляниця	272,02	4,75	276,77	0,5	13,27	6,18	420	720	116243	199274
11	Цех виробництва авто-кабельних мереж	251,27	279,38	530,65	0,5	18,38	189,54	390	690	206952	366146
12	Ремонтно-механічний цех	301,94	131,14	433,08	0,5	16,60	109,01	390	690	168902	298827
	Сума по заводу	8134	2484,3	10618,2						2157725,46	4765727,81

Результати

$X_{гпп} =$	203,2	6,8
$Y_{гпп} =$	448,8	15,0

3. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ СХЕМ ЗОВНІШНЬОГО ТА ВНУТРІШНЬОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПІДПРИЄМСТВА

3.1. Схема приєднання та вибір напруги живлення

Формування раціональної структури зовнішнього електропостачання (СЗЕ) автомобільного заводу є ключовим етапом проектування. Від правильно обраної живлячої напруги та топології мережі залежить не лише надійність роботи технологічних ліній, але й загальна економічна ефективність підприємства.

До основних критеріїв, що формують проектне рішення, належать: сумарне розрахункове навантаження об'єкта (10513,9 кВА), віддаленість від джерела живлення (6 км) та наявність відповідних рівнів напруг на районній підстанції енергосистеми. Зважаючи на ці фактори, до техніко-економічного порівняння приймаються два конкурентні варіанти: живлення на генераторній напрузі 10 кВ та живлення на напрузі 35 кВ із будівництвом власної головної знижувальної підстанції (ГЗП).

Оскільки обидва варіанти передбачають дволанцюгове виконання мереж (що гарантує необхідну надійність для споживачів I та II категорій), очікуваними збитками від аварійних перерв електропостачання у даному розрахунку нехтуємо.

Критерієм вибору є мінімум зведених економічних витрат:

$$Z_i = E_n \cdot K_i + C_{\text{експл.і}} + C_{\text{втр.і}} + C_{\text{ен.і}}$$

де $E_n = 0,12$ — нормативний коефіцієнт ефективності капіталовкладень;

K_i — сумарні капітальні інвестиції в будівництво, тис. грн;

$C_{\text{експл.і}}$ — поточні витрати на амортизацію та обслуговування мереж, тис. грн;

						Арк.

$C_{\text{втр.і}}$ — річна вартість втраченої в елементах мережі електроенергії, тис. грн;

$C_{\text{ен.і}}$ — річна вартість спожитої електроенергії підприємством (залежить від тарифу для відповідного класу напруги), тис. грн.

Відповідно до діючих нормативів, вартість електроенергії для промисловості диференціюється: для 2-го класу напруги (до 35 кВ, тобто 10 кВ) тариф становить $C_{0(10)} = 8,50$ грн/кВт·год; для 1-го класу напруги (35 кВ і вище) тариф є пільговим і становить орієнтовно $C_{0(35)} = 7,10$ грн/кВт·год.

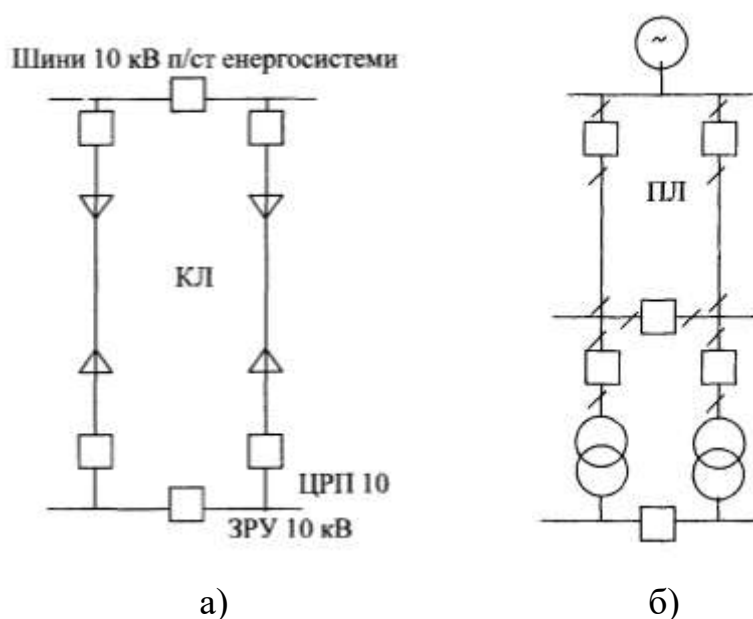


Рисунок 3.1. Варіанти конфігурації мережі зовнішнього електропостачання підприємства (а – 10 кВ; б – 35 кВ)

Аналіз варіанта 1: Живлення на напрузі 10 кВ

Струм у лінії живлення в нормальному режимі:

$$I_{p(10)} = \frac{S_p}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{лн}}} = \frac{10513,9}{1,732 \cdot 10,5} = 578,1 \text{ А}$$

За економічною густиною струму визначаємо переріз. Для забезпечення пропускної здатності приймаємо до прокладання чотири паралельні кабельні лінії (по 2 на ланцюг) марки ААШв $3 \times 240 \text{ мм}^2$ (допустимий струм одного кабелю 340 А).

						Арк.

Коефіцієнт завантаження ліній:

$$K_{z(10)} = \frac{578,1}{4 \cdot 340} = 0,42$$

Сумарні втрати енергії в кабельних лініях (при часі максимальних втрат $\tau = 2270$ год):

$$\Delta W_{10} = \Delta P_{\text{лкм}} \cdot L_{\Sigma} \cdot K_z^2 \cdot \tau = 38 \cdot 24 \cdot 0,42^2 \cdot 2270 = 365243 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

Вартість втрат:

$$C_{\text{втр}(10)} = 365243 \cdot 8,50 \cdot 10^{-3} = 3104,5 \text{ тис. грн.}$$

Аналіз варіанта 2: Живлення на напрузі 35 кВ із спорудженням ГЗП

Розрахунковий струм для напруги 35 кВ:

$$I_{p(35)} = \frac{10513,9}{\sqrt{3} \cdot 35} = 173,4 \text{ А}$$

Приймаємо до будівництва дволанцюгову повітряну лінію проводом АС-150. На території заводу проектується ГЗП із двома трансформаторами ТМН-6300/35/10.

Завантаження трансформаторів у нормальному режимі:

$$K_{3,Т} = \frac{S_p}{2 \cdot S_{\text{НОМ}}} = \frac{10513,9}{2 \cdot 6300} = 0,83$$

Перевірка на аварійне перевантаження: у разі відключення одного трансформатора, коефіцієнт завантаження робочого апарата складе $K_{3,Т} = 1,66$. Оскільки ПТЕЕС обмежують тривале перевантаження на рівні 1,4, в післяаварійному режимі передбачається автоматичне відключення невідповідальних споживачів III категорії (вентиляція, допоміжні склади), що є цілком допустимим технічним рішенням.

Втрати енергії в трансформаторах та ПЛ-35 кВ:

$$\Delta W_{35} = 480416 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

Вартість втрат (за тарифом 1-го класу):

$$C_{\text{втр}(35)} = 480416 \cdot 7,10 \cdot 10^{-3} = 3410,9 \text{ тис. грн.}$$

						Арк.

Обсяг спожитої заводом активної енергії за рік становить $W_a = 27102712$ кВт·год (згідно з розрахунками розділу 2). Вартість цієї енергії кардинально відрізняється залежно від класу напруги на точці розмежування.

Таблиця 3.1. Зведена відомість капітальних вкладень

Варіант	Найменування елементів схеми	Одиниця	Кількість	Вартість одиниці, тис. грн.	Всього Кі, тис. грн.
I (10 кВ)	Кабельна лінія ААШв 3х240	км	24	400	9600
	Земляні роботи (траншея)	км	6	233	1400
	Всього по Варіанту I				11000
II (35 кВ)	Повітряна лінія 35 кВ	км	12	450	5400
	Трансформатори ТМН-6300/35/10	шт.	2	3250	6500
	ВРП-35 кВ та комірки	компл.	1	1100	1100
	Всього по Варіанту II				13000

Таблиця 3.2. Підсумкові техніко-економічні показники варіантів

Показник	Варіант I (10 кВ)	Варіант II (35 кВ)
Капітальні інвестиції (Кі), тис. грн.	11000	13000
Амортизація та обслуговування (Сексп.і), тис. грн.	1100	2060
Вартість втрат електроенергії (Свтр.і), тис. грн.	3104,5	3410,9
Вартість спожитої заводом енергії (Сен.і), тис. грн.	230373	192429,2
Сумарні зведені витрати (Зі), тис. грн.	235897,5	199460,1

Висновок: Незважаючи на те, що спорудження власної підстанції 35/10 кВ вимагає більших стартових капіталовкладень (13,0 млн грн порівняно з 11,0 млн грн для мережі 10 кВ) та зумовлює дещо вищі технічні втрати у трансформаторах, *Варіант II (35 кВ) є беззаперечно кращим.* Це пояснюється

						Арк.

тим, що живлення на рівні 35 кВ дозволяє підприємству розраховуватися за електроенергію за дешевшим тарифом 1-го класу. Щорічна економія на оплаті за електроенергію становить майже 38 мільйонів гривень, що окупає будівництво власної ГЗП менш ніж за півроку. Тому до впровадження у проект остаточно приймається схема живлення на напрузі 35 кВ.

3.2. Вибір напруги і схеми внутрішнього електропостачання

Організація енергорозподілу в межах промислового майданчика заводу автомобільних комплектуючих базується на принципах надійності, гнучкості та економічної доцільності. Для передачі потужності від головної знижувальної підстанції (ГЗП) до центрів навантаження виробничих підрозділів прийнято напругу 10 кВ. Це дозволяє мінімізувати перетини кабельних ліній та зменшити падіння напруги в розподільчій мережі.

Трансформація напруги до рівня 0,4 кВ (380/220 В) для безпосереднього живлення верстатного парку, автоматизованих ліній та освітлювальних установок здійснюється на восьми цехових підстанціях (ТП №1–8). Згідно з розрахунками навантажень та категорійністю електроприймачів, усі підстанції прийняті двотрансформаторними (тип КТП), що забезпечує взаємне резервування секцій шин 0,4 кВ у разі аварійного виходу з ладу одного з силових апаратів.

Внутрішньозаводське транспортування електроенергії на напрузі 10 кВ реалізується кабельною мережею. Основним методом монтажу обрано відкрите прокладання кабелів по спеціалізованих технологічних естакадах. Такий підхід, порівняно з прокладанням у траншеях, суттєво полегшує проведення оглядів, планових ремонтів та забезпечує кращі умови охолодження провідників, що особливо важливо в умовах щільної промислової забудови.

Структурна побудова високовольтної мережі виконана за комбінованим (змішаним) принципом:

						Арк.

- *Радіальна схема (двоколові фідери):* застосована для живлення ключових виробничих ланок (цех термообробки, штампувальна дільниця, механоскладальний корпус). Використання окремих ліній для кожного трансформатора гарантує максимальну живучість системи при локальних пошкодженнях мережі.

- *Магістральна схема:* впроваджена для електропостачання допоміжних та інфраструктурних об'єктів (складське господарство, адміністративно-побутовий корпус, ремонтні майстерні). Це дозволяє раціонально використовувати кабельну продукцію та комутаційну апаратуру без зниження загального рівня надійності роботи заводу.

Обрана конфігурація внутрішнього електропостачання дозволяє підтримувати стабільні параметри якості напруги на клеммах чутливого мікропроцесорного обладнання та забезпечує необхідний резерв пропускної здатності для майбутньої модернізації виробничих потужностей.

						Арк.

4. КОМПЕНСАЦІЯ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ

4.1. Розрахунок балансу реактивної потужності та вибір пристроїв для її компенсації

Раціональне управління потоками реактивної потужності (РП) є критичним фактором для забезпечення енергоефективності заводу автомобільних комплектуючих. Оскільки ми прийняли схему зовнішнього живлення на напрузі 35 кВ із встановленням власних трансформаторів ТМН-6300/35/10, компенсація РП дозволяє не лише знизити втрати, але й оптимізувати режим роботи цих трансформаторів, запобігаючи їх перевантаженню.

Вихідними даними для розрахунку є показники сумарного навантаження заводу на стороні 10 кВ:

- Розрахункова активна потужність: $P_p = 7039,3 \text{ кВт}$.
- Розрахункова реактивна потужність: $Q_p = 7809,6 \text{ квар}$.

Згідно з вимогами енергосистеми для споживачів 1-го класу напруги, цільовий рівень компенсації становить $\text{tg}\varphi = 0,15$. Економічно обґрунтована потужність, яку дозволено отримувати з мережі 35 кВ:

$$Q_e = P_p \cdot \text{tg}\varphi = 7039,3 \cdot 0,15 = 1055,9 \text{ квар}.$$

Необхідна сумарна потужність компенсуючих пристроїв (КП) заводу:

$$Q_{\text{КП}} = Q_p - Q_e = 7809,6 - 1055,9 = 6753,7 \text{ квар}.$$

Вся зазначена потужність генерується батареями статичних конденсаторів (БСК).

4.2. Вибір кількості, потужності та місця розташування пристроїв компенсації реактивної

Для досягнення максимального технічного ефекту (розвантаження цехових трансформаторів та внутрішніх ліній 10 кВ), компенсація реалізується на двох рівнях:

						Арк.

1. *Низьковольтний рівень (0,4 кВ):* встановлення БСК безпосередньо на шинах цехових ТП №1–8. Це дозволяє зменшити струми в трансформаторах 10/0,4 кВ. Сумарна прийнята потужність — 4000 квар.

2. *Високовольтний рівень (10 кВ):* встановлення централізованої БСК на шинах 10 кВ ГЗП для докомпенсації до нормативного рівня. Прийнята потужність — 2750 квар.

Таблиця 4.1. Розподіл низьковольтних БСК за вузлами навантаження

Підстанція	К-сть тр-рів	Рр, кВт	Qр, квар	Qкн, квар	Qзал, квар	Sp, кВА	Кз
ТП №1,2,3	6	3213	3332,6	1600	1732,6	3650	0,61
ТП №4,5	4	2661	1730,5	850	880,5	2803	0,7
ТП №6	2	1399	992	500	492	1483	0,74
ТП №7	2	1392,9	1131,5	550	581,5	1509	0,75
ТП №8	2	1188,8	953,2	500	453,2	1272	0,64
Разом:	16	9854,7	8139,8	4000	—	—	—

Порівняння варіантів проводиться з урахуванням вартості обладнання та щорічних витрат на відшкодування втрат активної потужності в конденсаторах. Оскільки завод живиться на напрузі 35 кВ, розрахунок ведеться за тарифом 7,10 грн/кВт·год.

Таблиця 4.2. Вартість встановленого підстанційного обладнання

Об'єкт	Тип обладнання	Кількість	Вартість, тис. грн
ГЗП 35/10 кВ	Трансформатор ТМН-6300/35/10	2 шт	6500
Цехові ТП	Комплектна ТП 1000 кВА (2-тр)	8 шт	12000
Всього:			18500

Для остаточного вибору порівнюємо три стратегії компенсації:

1. *Варіант 1:* Повна компенсація на стороні 0,4 кВ.
2. *Варіант 2:* Змішана схема (проектна).
3. *Варіант 3:* Переважна компенсація на стороні 10 кВ.

						Арк.

Таблиця 4.3. Техніко-економічні показники систем компенсації РП

Показник	Варіант 1	Варіант 2 (проектний)	Варіант 3
Потужність БСК 0,4 кВ, квар	6750	4000	0
Потужність БСК 10 кВ, квар	0	2750	6750
Капітальні інвестиції (Кбск), тис. грн	9450	8075	6075
Втрати потужності в БСК ($\Delta P_{бск}$), кВт	30,37	26,25	20,25
Вартість втрат за рік (Свтр), тис. грн	489,6	423,1	326,4
Зведені річні витрати (З), тис. грн	1623,6	1392,1	1055,4

Обґрунтування вибору: Хоча варіант 3 має найменші зведені витрати на папері, для промислового підприємства з великою кількістю цехових трансформаторів (16 шт. по 1000 кВА) критично важливо розвантажити саме внутрішні мережі та трансформатори ГЗП 6300 кВА. Встановлення БСК лише на 10 кВ призвело б до перегріву цехових трансформаторів реактивними струмами. Тому *Варіант 2* є оптимальним компромісом між економікою та технічною надійністю.

						Арк.

Таблиця 4.1. Підсумкова відомість навантажень підприємства після оптимізації перетоків реактивної потужності

№	Назва групи споживачів	Кількість ЕС	Р одного			P_{Σ}	m	K_B	$\cos \varphi$	$tg \varphi$	Середнє		n_E	K_M	Розрахункове навантаження		
			min	...	max						$P_{CM},$ кВт	$Q_{CM},$ квар			$P_p,$ кВт	$Q_p,$ квар	$S_p,$ кВА
1	2	3	4		5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
ТП №1,2,3 (6х1000)																	
1	Цех термооб.металів																
	Силове навантаження	100	5,1	...	107	4263	20,98	0,58	0,65	1,17	2473	2891	79,68	1,09	2697,5	2890,7	3953,8
	Освітлювальне навантаження										204	99			216,9	105,0	241,0
	Всього										2676	2989			2914,4	2995,8	4179,5
2	Цех лиття пластмас під тиском																
	Силове навантаження	21	5,1	...	51	456,75	10	0,34	0,7	1,02	155	158	17,91	1,39	215,7	158,4	267,6
	Освітлювальне навантаження										38	19			279,4	135,3	310,4
	Всього										194	177			495,1	293,7	575,6
3	Адміністративно-побутовий корпус																
	Силове навантаження	78	30,5	...	51	203	1,672	0,7	0,9	0,48	142	69	78	1	142,1	68,8	157,9
	Освітлювальне навантаження										201	97			192,7	93,3	214,1
	Всього										343	166			334,8	162,2	372,0
Всього силова по ТП 1,2,3		199	5,1	...	107	4923	21	0,56	0,66	1,13	2770	3118	92	1,09	3014,3	3118,0	4336,8
Всього освітлювальна по ТП 1,2,3											443	215			689,0	333,7	765,5
Всього на шинах 0,4 кВ по ТП 1,2,3											3213	3333			3703,2	3451,7	5062,4
КП 0,4 кВ																-1500	
Навантаження з ур. КП 0,4 кВ															3703,2	1951,7	5062,4
Втрати в тр-рах ТП 1,2,3															65,5	328,1	334,5
Всього на шинах 10 кВ по ТП 1,2,3															3768,7	2279,7	4404,6

Продовження табл. 4.1.

ТП №4,5 (4x1000)																	
1	Штампувальний цех																
	Силове навантаження	49	5,1	...	51	1969,1	10	0,27	0,65	1,17	532	622	49	1,26	671,5	621,6	915,0
	Освітлювальне навантаження										255	123			271,2	131,4	301,3
	Всього										787	745			942,7	752,9	1206,4
2	Цех виробництва елементів підвіски																
	Силове навантаження	117	10,2	...	102	4516,75	10	0,31	0,88	0,54	1400	756	88,56	1,17	1638,0	755,7	1804,0
	Освітлювальне навантаження										474	230			504,6	244,4	560,7
	Всього по цеху										1874	985			2142,6	1000,1	2364,5
Всього силова по ТП 4,5		166	5,1	...	102	6486	20	0,30	0,81	0,71	1932	1377	127	1,14	2208,9	1377,3	2603,1
Всього освітлювальна по ТП 4,5											729	353			775,8	375,7	862,0
Всього на шинах 0,4 кВ по ТП 4,5											2661	1730			2984,7	1753,1	3461,4
Компенсуючі пристрої 0,4 кВ																-800,0	
Навантаження з урахуванням КП 0,4 кВ															2984,7	953,1	3461,4
Втрати в тр-рах ТП 4,5															47,9	234,2	239,1
Всього на шинах 10 кВ по ТП 4,5															3032,6	1187,3	3256,7

Арк.

Продовження табл. 4.1.

ТП №6 (2x1000)																	
1	Механоскладальний цех																
	Силове навантаження	38	10,2	...	102	1277,75	10	0,29	1,02	1,22	371	453	25,05	1,36	505,5	453,1	678,9
	Освітлювальне навантаження										416	202			443,0	214,6	492,2
	Всього										787	655			948,6	667,7	1160,0
2	Склад металопрокату																
	Силове навантаження	17	5,1	...	10	121,8	1,961	0,1	0,5	1,73	12	21	17	1,9	23,2	21,1	31,3
	Освітлювальне навантаження										61	0			36,7	0,0	36,7
	Всього										73	21			59,9	21,1	63,5
3	Ремонтно-механічний цех																
	Силове навантаження	44	5,1	...	41	870,25	8,039	0,27	0,7	1,02	235	240	42,45	1,29	301,9	239,7	385,5
	Освітлювальне навантаження										123	60			131,1	63,5	145,7
	Всього										358	299			433,1	303,2	528,7
Всього силова по ТП 6		99	5,1	...	102	2270	20	0,27	0,65	1,16	618	714	45	1,28	788,1	713,9	1063,4
Всього освітлювальна по ТП 6											601	261			610,8	278,1	671,2
Всього на шинах 0,4 кВ по ТП 6											1218	975			1399,0	992,0	1715,0
Компенсуючі пристрої 0,4 кВ																-	
Навантаження з урахуванням КП 0,4 кВ															1399,0	592,0	1715,0
Втрати в тр-рах ТП 6															24,0	117,1	119,5
Всього на шинах 10 кВ по ТП 6															1422,9	709,1	1589,8

ТП №7 (2х1000)																	
1	Цех виробництва авто-кабельних мереж																
	Силове навантаження	18	1,1	...	20	571,44	18,18	0,31	0,7	1,02	177	181	18	1,42	251,3	180,7	309,5
	Освітлювальне навантаження										474	230			279,4	135,3	310,4
	Всього										651	410			530,6	316,0	617,6
2	Цех зварювання автовузлів																
	Силове навантаження	33	5,1	...	76	1065,75	14,9	0,4	0,6	1,33	426	568	28,05	1,26	536,8	568,4	781,8
	Освітлювальне навантаження										315	153			335,4	162,5	372,7
	Всього										742	721			872,3	730,9	1138,0
Всього силова по ТП 7		51	1	...	76	1637	69	0,37	0,63	1,24	603	749	43	1,22	735,9	749,1	1050,1
Всього освітлювальна по ТП 7											789	382			614,8	297,8	683,1
Всього на шинах 0,4 кВ по ТП 7											1393	1131			1350,7	1046,9	1708,9
Компенсуючі пристрої 0,4 кВ																-700,0	
Навантаження з урахуванням КП 0,4 кВ															1350,7	346,9	1708,9
Втрати в тр. ТП 7															19,0	99,4	101,2
Всього на шинах 10 кВ по ТП 7															1369,7	446,3	1440,6

[illegible]

K3=	0,688
tgφ1 =	0,718767
Qкп =	4003,711
Q' =	1 056
tgφ2 =	0,15

Ask.

5. ТРАНСФОРМАТОРНІ ПІДСТАНЦІЇ

5.1. Вибір кількості та потужності трансформаторів

Надійність функціонування системи електропостачання автомобільного заводу базується на раціональному виборі силових трансформаторів. Їх параметри визначаються на основі розрахункових навантажень об'єкта після впровадження засобів компенсації реактивної потужності (РП), з обов'язковою перевіркою здатності обладнання забезпечити живлення споживачів у післяаварійних режимах.

Завдяки встановленню батарей статичних конденсаторів (БСК) у мережах 0,4 кВ та 10 кВ (див. Розділ 4), реактивна потужність, яка транспортується з енергосистеми через головну знижувальну підстанцію (ГЗП), була знижена до економічно доцільного рівня $Q_e = 1055,9$ квар. Відповідно, скоргована повна розрахункова потужність, що протікає через трансформатори ГЗП, становить:

$$S_{p.ГЗП} = \sqrt{P_p^2 + Q_e^2} = \sqrt{7039,3^2 + 1055,9^2} = 7118,0 \text{ кВА}$$

Мінімально необхідна потужність одного трансформатора ГЗП (за умови двотрансформаторної схеми $n = 2$) визначається за виразом:

$$S_{Т.ГЗП} = \frac{S_{p.ГЗП} \cdot K_{PE3}}{K_{AB} \cdot (n - 1)}$$

$K_{PE3} = 0,9$ — коефіцієнт, що враховує типовий резерв потужності для промислових підприємств;

$K_{AB} = 1,4$ — максимально допустимий коефіцієнт перевантаження масляного трансформатора при аварії (згідно з ПТЕЕС).

$$S_{Т.ГЗП} = \frac{7118,0 \cdot 0,9}{1,41} = 4575,8 \text{ кВА}$$

Згідно зі стандартним рядом номінальних потужностей, приймаємо до встановлення на ГЗП два трансформатори типу ТМН-6300/35/10.

Коефіцієнт завантаження агрегатів у нормальному режимі:

						Арк.

$$K_{3,НОРМ} = \frac{7118,0}{2 \cdot 6300} = 0,56$$

У післяаварійному режимі (вихід з ладу одного трансформатора) все навантаження підприємства лягає на робочий апарат. Коефіцієнт аварійного перевантаження складе:

$$K_{3,АВ} = \frac{7118,0}{6300} = 1,13$$

Оскільки отримане значення значно менше нормативного обмеження ($1,13 < 1,4$), ГЗП здатна повністю забезпечити електроенергією всіх споживачів заводу (навіть III категорії) без застосування графіків аварійного розвантаження. Це підтверджує високу ефективність попередньо обраної системи компенсації РП.

Вибір трансформаторів для цехових підстанцій здійснюється за аналогічним принципом, виходячи з навантажень вузлів на шинах 0,4 кВ після встановлення низьковольтних БСК. Для забезпечення надійності всі ТП проектуються двотрансформаторними.

Наприклад, для ТП №1,2,3, що обслуговують цех термообробки металів, навантаження однієї підстанції (2 трансформатори) після компенсації становить

$$S_p = 1216,7 \text{ кВА.}$$

Необхідна потужність трансформатора ТП:

$$S_{Т.ТП} = \frac{1216,7}{1,4} = 869,1 \text{ кВА}$$

Обираємо трансформатори номіналом 1000 кВА.

Коефіцієнт завантаження в нормальному режимі:

$$K_{3,ав} = 1216,7 / (2 \cdot 1000) = 0,61$$

В аварійному: $K_{3,ав} = 1216,7 / 1000 = 1,22$ (що вписується в норму $\leq 1,4$).

Детальні результати розрахунків та вибору обладнання для всіх підстанцій заводу систематизовано в Таблиці 5.1.

						Арк.

Таблиця 5.1. Параметри вибору силових трансформаторів підприємства

Назва підстанції	К-сть (п)	Розрахункова потужність Sp, кВА*	Тип обраного трансформатора	Кз (норм. режим)	Кз.ав (авар. режим)
ГЗП	2	7118	ТМН-6300/35/10	0,56	1,13
ТП № 1	2	1216,7	ТМЗ-1000/10/0,4	0,61	1,22
ТП № 2	2	1216,7	ТМЗ-1000/10/0,4	0,61	1,22
ТП № 3	2	1216,6	ТМЗ-1000/10/0,4	0,61	1,22
ТП № 4	2	1401,5	ТМЗ-1000/10/0,4	0,7	1,4
ТП № 5	2	1401,5	ТМЗ-1000/10/0,4	0,7	1,4
ТП № 6	2	1483	ТМЗ-1000/10/0,4	0,74	1,48*
ТП № 7	2	1509	ТМЗ-1000/10/0,4	0,75	1,51*
ТП № 8	2	1272	ТМЗ-1000/10/0,4	0,64	1,27

**Примітка 1: Потужність S_p вказана з урахуванням розвантаження мережі від реактивної складової завдяки встановленню БСК. Примітка 2: Для ТП №6 та ТП №7, де аварійне перевантаження незначно перевищує 1,4, проектом передбачається переведення невідповідального освітлення та допоміжної вентиляції у режим очікування на час ліквідації аварії.*

5.2. Компоновка та місце розташування трансформаторних підстанцій

Задля зменшення втрат напруги та скорочення довжини розподільчих мереж 0,4 кВ, цехові підстанції розташовуються максимально близько до центрів електричних навантажень (ЦЕН) відповідних виробничих підрозділів.

Для машинобудівних підприємств та заводів автокомплектуючих найбільш раціональним є використання комплектних трансформаторних підстанцій (КТП) внутрішнього або прибудованого виконання. Застосування трансформаторів типу ТМЗ (у герметичному виконанні з азотною подушкою) гарантує високий рівень пожежної безпеки, що дозволяє монтувати їх безпосередньо у виробничих цехах без спорудження окремих вогнетривких камер. Розподіл підстанцій за об'єктами генплану наведено в Таблиці 5.2.

Аналіз результатів, наведених у таблиці 5.2, дозволяє констатувати, що розміщення цехових трансформаторних підстанцій виконано з дотриманням принципу максимального наближення до центрів електричних навантажень

						Арк.

(ЦЕН). Вибір трансформаторів типу ТМЗ (герметичних) зумовлений високими вимогами до пожежної безпеки в умовах автомобільного виробництва, де присутні мастильні матеріали, пластмаси та лакофарбові покриття. Це дозволяє монтувати підстанції безпосередньо у виробничих зонах без спорудження масивних вогнетривких перегородок.

Таблиця 5.2. Локалізація та компонування цехових підстанцій

№ ТП	Навантаження Sp, кВА	Тип комплектної підстанції	Фактичне місце розташування	Архітектурне виконання
ТП 1	1216,7	2КТП-1000- 10/0,4	Цех термообробки металів	Вбудована
ТП 2	1216,7	2КТП-1000- 10/0,4	Цех лиття пластмас під тиском	Вбудована
ТП 3	1216,6	2КТП-1000- 10/0,4	Адміністративно- побутовий корпус	Прибудована
ТП 4	1401,5	2КТП-1000- 10/0,4	Штампувальний цех	Вбудована
ТП 5	1401,5	2КТП-1000- 10/0,4	Цех виробництва елементів підвіски	Вбудована
ТП 6	1483	2КТП-1000- 10/0,4	Механоскладальний цех / Склади	Прибудована
ТП 7	1509	2КТП-1000- 10/0,4	Цех зварювання / Виробництво кабелів	Вбудована
ТП 8	1272	2КТП-1000- 10/0,4	Головний складальний цех	Вбудована

						Арк.

6. РОЗРАХУНОК СТРУМІВ КОРОТКИХ ЗАМИКАНЬ І ВИБІР ОБЛАДНАННЯ ЕЛЕКТРОУСТАНОВОК ТА СИЛОВИХ МЕРЕЖ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

6.1. Розрахунок струмів короткого замикання (КЗ)

Визначення струмів короткого замикання (КЗ) починається з розробки розрахункової однолінійної схеми електропостачання підприємства. До цієї схеми включаються джерела живлення, а також усі проміжні елементи (повітряні та кабельні лінії, силові трансформатори), через які протікатиме струм до місця ймовірного пошкодження.

Для машинобудівних підприємств та заводів автомобільної галузі розрахунок зазвичай виконується в іменованих одиницях (Омах), з приведенням усіх опорів до базисної напруги того ступеня, де знаходиться точка КЗ. Оскільки зовнішнє джерело живлення (районна підстанція 150/35/10 кВ) має значну потужність порівняно з навантаженням заводу, систему умовно приймаємо як джерело нескінченної потужності ($S_{\text{с}} = \infty$, $X_{\text{с}} \approx 0$).

На розрахунковій схемі позначаються ключові точки КЗ:

- К1: На шинах 10 кВ головної знижувальної підстанції (ГЗП).
- К2, К3, К4: На шинах 10 кВ віддалених цехових підстанцій (ТП).
- К5, К6, К7: На шинах 0,4 кВ (низька сторона) відповідних цехових ТП.

Значення періодичної складової струму трифазного КЗ визначається за законом Ома:

$$I_{n0} = I'' = \frac{U_{\text{ср}}}{\sqrt{3} \cdot Z_{\Sigma}}$$

де $U_{\text{ср}}$ — середня номінальна напруга ступеня мережі, де відбулося замикання (10,5 кВ або 0,4 кВ);

						Арк.

$Z_{\Sigma} = \sqrt{R_{\Sigma}^2 + X_{\Sigma}^2}$ — результуючий повний опір кола до точки КЗ, Ом.

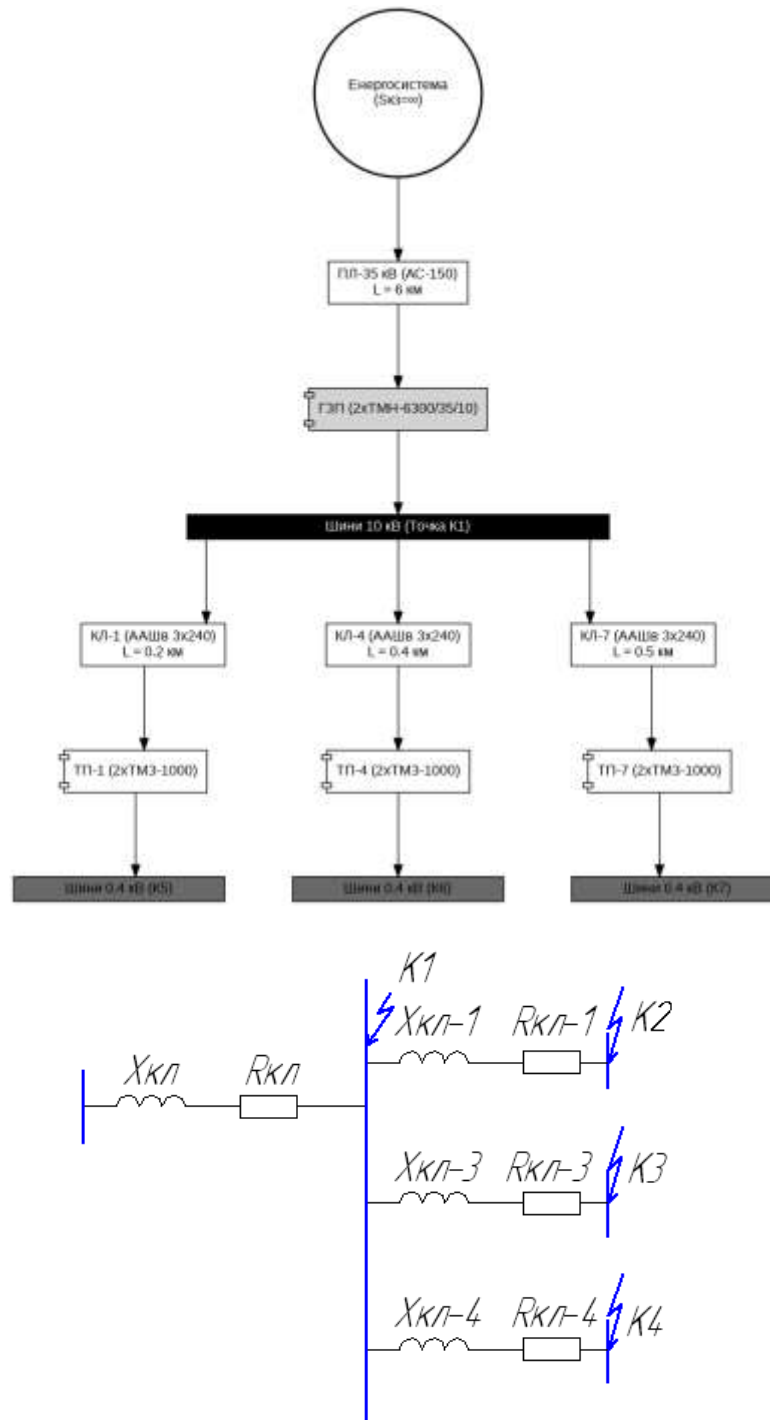


Рисунок 6.1. Базова розрахункова та еквівалентна схеми підприємства для моделювання аварійних режимів

Максимальне миттєве значення струму (ударний струм КЗ), який визначає електродинамічну дію на апарати та шини, розраховується за виразом:

$$i_y = \sqrt{2} \cdot I_{n0} \cdot K_y$$

де K_y — ударний коефіцієнт, що залежить від сталої часу затухання аперіодичної складової (T_a):

$$K_v = 1 + e^{-\frac{0,01}{T_a}} \text{ €}$$

$$T_a = \frac{X_\Sigma}{\omega \cdot R_\Sigma}$$

де $\omega = 314$ рад/с — кутова частота змінного струму.

Приклад розрахунку для точки K1 (Шини 10 кВ ГЗП): опір повітряної лінії 35 кВ (АС-150, $L = 6$ км), приведений до напруги 10,5 кВ:

$$X_{III} = x_0 \cdot L \cdot \left(\frac{10,5}{37} \right)^2 = 0,4 \cdot 6 \cdot 0,08 = 0,19 \text{ Ом}$$

$$R_{III} = r_0 \cdot L \cdot \left(\frac{10,5}{37} \right)^2 = 0,21 \cdot 6 \cdot 0,08 = 0,10 \text{ O}_M$$

Опір трансформатора ГЗП (ТМН-6300/35/10, $u_k = 7,5\%$, $\Delta P_k = 46,5 \text{ кВт}$):

$$X_{\Sigma 1} = \frac{u_k}{100} \cdot \frac{U_{cp}^2}{S_{HOM}} = \frac{7,5}{100} \cdot \frac{10,5^2}{6,3} = 1,31 \text{ OM}$$

$$R_{\Sigma 1} = \frac{\Delta P_k \cdot U_{cp}^2}{S_{HOM}^2} = \frac{0,046510,5^2}{6,3^2} = 0,13 \text{ OM}$$

Враховуючи паралельну роботу двох трансформаторів ГЗП в режимі максимальних навантажень, результуючі опори до точки К1 складуть:

$$X_{\Sigma 1} = X_{II} + \frac{X_{\text{tp1}}}{2} = 0,19 + 0,655 = 0,845 \text{ Ом}$$

$$Z_{\Sigma 1} = \sqrt{0,845^2 + 0,165^2} = 0,86 \text{ OM}$$

Періодичний струм КЗ на шинах 10 кВ:

$$I_{n0(K1)} = \frac{10,5}{\sqrt{3} \cdot 0,86} = 7,05 \text{ кА}$$

Стала часу та ударний струм:

						Арк

$$T_a = \frac{0,845}{314 \cdot 0,165} = 0,0163 \text{ с}$$

$$K_y = 1 + e^{\frac{0,01}{0,0163}} = 1,54$$

$$i_{y(K1)} = \sqrt{2} \cdot 7,051,54 = 15,35 \text{ кА}$$

Аналогічно обчислюються струми для всіх інших контрольних точок мережі з урахуванням опору кабельних ліній 10 кВ (марки ААШВ) та параметрів цехових трансформаторів ТМЗ-1000/10/0,4 ($u_k = 5,5\%$). Результати зведено до Таблиці 6.1.

Таблиця 6.1. Зведена відомість результатів розрахунку струмів КЗ

Точка КЗ	Місцезнаходження пошкодження	X_Σ , Ом	R_Σ , Ом	T_a , с	K_y	I_{n0} , кА	i_y , кА
К1	Шини 10 кВ ГЗП	0,845	0,165	0,0163	1,54	7,05	15,35
К2	Шини 10 кВ ТП-1 (кабель 0,2 км)	0,861	0,215	0,0127	1,45	6,81	13,96
К3	Шини 10 кВ ТП-4 (кабель 0,4 км)	0,877	0,265	0,0105	1,38	6,58	12,84
К4	Шини 10 кВ ТП-7 (кабель 0,5 км)	0,885	0,29	0,0097	1,35	6,47	12,35
К5	Шини 0,4 кВ ТП-1 (через ТМЗ-1000)	0,010*	0,002*	0,0159	1,53	22,6	48,88
К6	Шини 0,4 кВ ТП-4 (через ТМЗ-1000)	0,010*	0,002*	0,0159	1,53	22,55	48,77
К7	Шини 0,4 кВ ТП-7 (через ТМЗ-1000)	0,010*	0,002*	0,0159	1,53	22,5	48,66

*Примітка: для точок К5-К7 опори приведені до базисної напруги 0,4 кВ.

6.2. Вибір струмопровідних пристроїв силових мереж

Визначення оптимального перерізу розподільчих кабельних ліній напругою 10 кВ, які забезпечують живлення цехових трансформаторних підстанцій (ТП-1 – ТП-8) від головної знижувальної підстанції (ГЗП), базується на методі економічної густини струму. Для кабелів з алюмінієвими жилами та паперовою ізоляцією при заданому часі використання максимуму навантаження нормативне значення економічної густини становить $j_{EK} = 1,4 \text{ А/мм}^2$. Зважаючи на вимоги

						Арк.

щодо безперебійності технологічних процесів та категорійність споживачів підприємства, архітектура живлення кожної ТП передбачає прокладання двох паралельних кабельних ліній (двотрансформаторна схема, $n = 2$).

Розрахунковий струм післяаварійного режиму (коли вся потужність цеху передається по одному кабелю) визначається як:

$$I_{p.ав} = \frac{S_p}{\sqrt{3} \cdot U_{НОМ}}$$

Економічно доцільна площа перерізу кабелю обчислюється для умов нормального режиму (коли навантаження рівномірно розподілене між двома лініями):

$$F_{ЕК} = \frac{I_{p.АВ}}{n \cdot j_{ЕК}}$$

Результати розрахунків та вибір попередніх марок кабелів для всіх вузлів навантаження зведено до Таблиці 6.2.

Таблиця 6.2. Технічні параметри та обґрунтування перерізів кабельних ліній напругою 10 кВ

Місце застосування	Sp, кВА	n, шт.	Ip.ав, А	Fек, мм ²	Обраний елемент	Ідоп, А
Від ГЗП до ТП №1	1216,7	2	66,9	23,9	ААШВ-10 (3х35)*	115
Від ГЗП до ТП №2	1216,7	2	66,9	23,9	ААШВ-10 (3х35)*	115
Від ГЗП до ТП №3	1216,6	2	66,9	23,9	ААШВ-10 (3х35)*	115
Від ГЗП до ТП №4	1401,5	2	77,1	27,5	ААШВ-10 (3х35)	115
Від ГЗП до ТП №5	1401,5	2	77,1	27,5	ААШВ-10 (3х35)	115
Від ГЗП до ТП №6	1483	2	81,5	29,1	ААШВ-10 (3х35)	115
Від ГЗП до ТП №7	1509	2	83	29,6	ААШВ-10 (3х35)	115
Від ГЗП до ТП №8	1272	2	69,9	25	ААШВ-10 (3х35)*	115

						Арк.

**Примітка: Переріз кабелів збільшено до 35 мм² за умовами термічної стійкості (див. розрахунок нижче).*

Перевірка обраних перерізів на термічну стійкість до струмів КЗ

Усі обрані кабельні лінії підлягають обов'язковій перевірці на термічну стійкість в умовах короткого замикання. Мінімальна площа перерізу, що здатна витримати теплове навантаження без руйнування ізоляції, обчислюється за виразом:

$$F_{\min} = \frac{I_k \cdot \sqrt{t_{3B}}}{C}$$

де I_k — діюче значення струму КЗ (приймаємо найбільше розраховане для мережі 10 кВ $I_k = 6,81$ кА); t_{3B} — зведений (фіктивний) час дії струму КЗ. З урахуванням швидкодії сучасного релейного захисту та часу відключення вакуумних вимикачів приймаємо $t_{3B} = 0,15$ с; C — термічний коефіцієнт для кабелів з алюмінієвими жилами та паперовою ізоляцією ($C = 85$).

Підставляючи значення, знаходимо мінімально допустимий переріз:

$$F_{\min} = \frac{6810 \cdot \sqrt{0,15}}{85} = \frac{6810 \cdot 0,387}{85} = 31,04 \text{ мм}^2$$

Висновок: Хоча для підстанцій ТП-1, 2, 3 та ТП-8 економічно доцільним був би переріз 25 мм² ($F_{ЕК} < 25$), такий кабель не витримає термічної дії струмів короткого замикання ($25 \text{ мм}^2 < F_{\min} = 31,04 \text{ мм}^2$). Тому для забезпечення повної безпеки, надійності та уніфікації кабельного господарства підприємства, для всіх живильних ліній 10 кВ остаточно приймається кабель марки ААШв-10 (3х35). Умови термічної стійкості та перевірки на перегрів в післяаварійному режимі ($I_{p.ав} \leq I_{дон}$) для цього кабелю повністю дотримані.

						Арк.

6.3. Вибір електрообладнання

Для надійного керування режимами роботи та відключення струмів короткого замикання (КЗ) на головній знижувальній підстанції (ГЗП) передбачається встановлення сучасних вакуумних вимикачів. Вибір цих апаратів здійснюється за номінальною напругою та струмом нормального і післяаварійного режимів, а додаткова перевірка — за умовами стійкості до струмів КЗ.

Вибір комутаційного та захисного обладнання для сторони 35 кВ ГЗП здійснюється за параметрами нормального режиму та перевіряється за умовами термічної та електродинамічної стійкості до струмів КЗ, розрахованих для точки К0 (ввід 35 кВ).

Згідно з розрахунками параметрів лінії АС-150 довжиною 6 км та потужністю системи, струм короткого замикання на стороні 35 кВ становить:

- Періодична складова: $I_{k(35)} = 7,67$ кА.
- Ударний струм: $i_{y(35)} = 13,23$ кА.
- Тепловий імпульс ($t = 1,5$ с): $B_{k(35)} = 91,5$ кА²·с.

Максимальний робочий струм вводу 35 кВ при аварійному перевантаженні одного трансформатора ТМН-6300:

$$I_{p.av(35)} = \frac{1,4 \cdot S_{НОМ}}{\sqrt{3} \cdot U_{НОМ}} = \frac{1,4 \cdot 6300}{1,732 \cdot 35} = 145,5 \text{ А}$$

Вибір елегазових вимикачів 35 кВ

Для комутації силових трансформаторів на відкритому розподільчому пристрої (ВРП) приймаємо до встановлення елегазові вимикачі колонкового типу серії ВГТ-35. Вони вирізняються високою надійністю, великим комутаційним ресурсом та здатністю працювати при низьких температурах.

						Арк.

Таблиця 6.3. Перевірка елегазових вимикачів ВГТ-35ІІ-20/1000

Параметри мережі 35 кВ	Умови вибору	Характеристики апарата
Номінальна напруга: 35 кВ	$U_p \leq U_{ном}$	35 кВ
Робочий струм: 145,5 А	$I_{р.ав} \leq I_{ном}$	1000 А
Струм КЗ: 7,67 кА	$I_k \leq I_{відкл}$	20,0 кА
Ударний струм: 13,23 кА	$i_y \leq i_{дин}$	52,0 кА
Тепловий імпульс: 91,5 кА ² ·с	$B_k \leq I_{терм2} \cdot t_{терм}$	202·3=1200 кА ² ·с

Вибір роз'єднувачів 35 кВ

Для створення видимого розриву електричного кола під час ремонту вимикачів або трансформаторів застосовуємо двоколонкові роз'єднувачі горизонтально-поворотного типу серії *РДЗ-35/1000*. Вони оснащені заземлювальними ножами для безпечного проведення робіт.

Таблиця 6.4. Перевірка роз'єднувачів РДЗ-35/1000 УХЛ1

Параметри мережі 35 кВ	Умови вибору	Характеристики апарата
Номінальна напруга: 35 кВ	$U_p \leq U_{ном}$	35 кВ
Робочий струм: 145,5 А	$I_{р.ав} \leq I_{ном}$	1000 А
Струм КЗ: 7,67 кА	$I_k \leq I_{відкл}$	20,0 кА
Ударний струм: 13,23 кА	$i_u \leq i_{дин}$	52,0 кА
Тепловий імпульс: 91,5 кА ² ·с	$B_k \leq I_{терм2} \cdot t_{терм}$	202·3=1200 кА ² ·с

Вимірювальні трансформатори 35 кВ

Для забезпечення роботи релейного захисту та комерційного обліку електроенергії на стороні високої напруги встановлюються:

1. *Трансформатори струму (ТС)*: Типу ТФЗМ-35 з коефіцієнтом трансформації 300/5\$. Вони перевірені за класом точності 0,5 для обліку та 10Р для захисту.
2. *Трансформатор напруги (ТН)*: Типу ЗНОМ-35 (заземлювальний, масляний). Він призначений для живлення вольтметрів, лічильників та реле напруги на загальнопідстанційному пункті керування.

						Арк

Таблиця 6.6. Перевірка лінійних вимикачів 10 кВ (до цехових ТП)

Розрахункові параметри мережі	Умови перевірки апаратів	Дані каталогу (ВВ/TEL-10-20/630)
Напруга мережі: 10 кВ	$U_p \leq U_{ном}$	Номінальна напруга: 10 кВ
Макс. струм лінії: 83,0 А	$I_{р.ав} \leq I_{ном}$	Номінальний струм: 630 А
Струм КЗ: 6,81 кА	$I_k \leq I_{відкл}$	Струм відключення: 20,00 кА
Уд. струм КЗ: 13,96 кА	$i_y \leq i_{дин}$	Струм електродинаміки: 51,0 кА
Тепловий імпульс: 30,73 кА ² ·с	$B_k \leq I_{терм2} \cdot t_{терм}$	Термічна стійкість: 1200 кА ² ·с

Система власних потреб (ВП) є життєво важливим елементом ГЗП, оскільки вона забезпечує безперебійну роботу кіл релейного захисту, мікропроцесорної автоматики, охолодження силових трансформаторів, а також освітлення й опалення кімнат КРПЗ.

У вигляді Таблиці 6.7. подано орієнтовний розрахунок електричного навантаження споживачів ВП.

Таблиця 6.7. Відомість навантажень власних потреб ГЗП

Група споживачів	Встановлена потужність, кВт	cosφ	tgφ	Розрахункова активна Р, кВт	Розрахункова реактивна Q, квар
Антиконденсатний підігрів КРП	14×0,4=5,6	1	0	5,6	0
Система обдуву (ТМН-6300)	2×2,5=5,0	0,8	0,75	5	3,75
Робоче та аварійне освітлення	3,5	1	0	3,5	0
Кола оперативного струму	2	0,9	0,48	2	0,96
Сумарне навантаження	16,1	—	—	16,1	4,71

Повна встановлена потужність:

$$S_{ВП} = \sqrt{P_{\Sigma}^2 + Q_{\Sigma}^2} = \sqrt{16,1^2 + 4,71^2} = 16,77 \text{ кВА}$$

						Арк.

Враховуючи коефіцієнт одночасності ($K_o = 0,8$), розрахункова потужність складе:

$$S_{p,qg} = 16,77 \cdot 0,8 = 13,4 \text{ кВА}$$

Для забезпечення найвищого (І) рівня надійності живлення оперативних кіл приймаємо до встановлення два трансформатори власних потреб (ТВП) типу *ТМ-25/10* (номінальна потужність 25 кВА, $U_{RH} = 10$ кВ, $U_{HH} = 0,4$ кВ).

У нормальному режимі кожен трансформатор завантажений на 26,8 %. У разі відключення одного з них, резервний апарат бере на себе все навантаження і буде завантажений на:

$$K_{3.ab} = \frac{13,4}{25} \cdot 100\% = 53,6\%$$

що гарантує високу надійність роботи ГЗП.

Для запобігання пошкодженню дороговартісної ізоляції силових трансформаторів та кабельних ліній від атмосферних (грозових) і комутаційних перенапруг, проектом передбачається використання сучасних обмежувачів перенапруг нелінійних (ОПН). На відміну від застарілих вентильних розрядників, ОПН не мають іскрових проміжків, що забезпечує миттєве спрацювання.

На кожному вводі 10 кВ силових трансформаторів та на секціях шин 10 кВ встановлюються обмежувачі типу *ОПН-П-10/11,5/10/2 УХЛП*.

Основні параметри обраних ОПН:

- Клас напруги мережі: 10кВ;
- Найбільша тривало допустима робоча напруга: 11,5 кВ;
- Номінальний розрядний струм: 10 кА.

Апарати ОПН підключаються паралельно до захищеного обладнання, а їх клема заземлення приєднуються до загального контуру заземлення ГЗП найкоротшим шляхом для мінімізації індуктивного опору струмовідводів.

						Арк

7. ЕНЕРГООЩАДЖЕННЯ ТА ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ АСИНХРОННИХ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ ПІДПРИЄМСТВА

7.1. Аналіз структури електроспоживання заводу автомобільних комплектуючих

Специфіка автомобілебудівної галузі полягає у високому рівні механізації та автоматизації виробничих процесів. Головними споживачами електричної енергії на проєктованому заводі є асинхронні електродвигуни (АД) змінного струму, які приводять у рух технологічне обладнання: штампувальні преси, зварювальних роботів, складальні конвеєри, а також загальнозаводські системи вентиляції, водопостачання та стисненого повітря.

Для розробки ефективної стратегії енергозбереження необхідно класифікувати наявний парк електродвигунів за типом механічного навантаження. Загальний орієнтовний баланс встановленої потужності асинхронних електроприводів по структурних підрозділах заводу наведено в Таблиці 7.1.

Таблиця 7.1. Розподіл типів електроприводів за технологічними цехами

Найменування підрозділу	Турбомеханізми (насоси, вентилятори, компресори), %	Механізми з постійним моментом (конвеєри, норії), %	Верстати та преси (ударне/змінне навантаження), %
Цех термообробки металів	60	10	30
Штампувальний цех	15	15	70
Цех виробництва елементів підвіски	20	30	50
Механоскладальний цех	20	35	45
Головний складальний цех	10	80	10
Цех зварювання автовузлів	30	40	30
Цех лиття пластмас під тиском	50	10	40
Киснево-компресорна дільниця	95	0	5

Узагальнюючи дані по всьому підприємству, можна сформувати звідний баланс споживання електроенергії за типами навантажень (Таблиця 7.2). Ця класифікація є базою для вибору конкретних технічних рішень з енергоощадження.

Таблиця 7.2. Зведений баланс електроприводів по заводу загалом

Тип технологічного навантаження	Частка від загальної потужності АД, %	Характерні механізми	Основний шлях енергозбереження
Квадратичний момент ($M_c \sim \omega^2$)	35%	Насоси охолодження, вентиляція, компресори	Впровадження перетворювачів частоти (ПЧ)
Постійний момент ($M_c = \text{const}$)	30%	Складальні конвесри, транспортери деталей	Оптимізація графіків роботи, ПЧ, перемикання «Δ-Y»
Змінний/Ударний момент	35%	Штампувальні преси, металообробні верстати	Перехід на енергоефективні двигуни (IE3)

7.2. Впровадження частотно-регульованого привода для насосних установок

У цеху термообробки металів та цеху лиття пластмас під тиском критично важливим є дотримання температурних режимів, що забезпечується потужною системою водяного охолодження. Історично регулювання витрати води в таких системах здійснювалося за допомогою механічних засувки (дроселювання). При цьому асинхронний двигун насоса постійно працює на номінальній швидкості, долаючи штучно створений гідравлічний опір, що призводить до колосальних втрат енергії.

Заміна дроселювання на частотне регулювання (ПЧ-АД) дозволяє змінювати швидкість обертання робочого колеса насоса відповідно до реальної потреби в охолодженні. За законами аерогідродинаміки, споживана потужність насоса пропорційна кубу швидкості ($P \sim \omega^3$). Зниження швидкості лише на 20% зменшує споживання енергії майже вдвічі.

Розрахунок економічної ефективності:

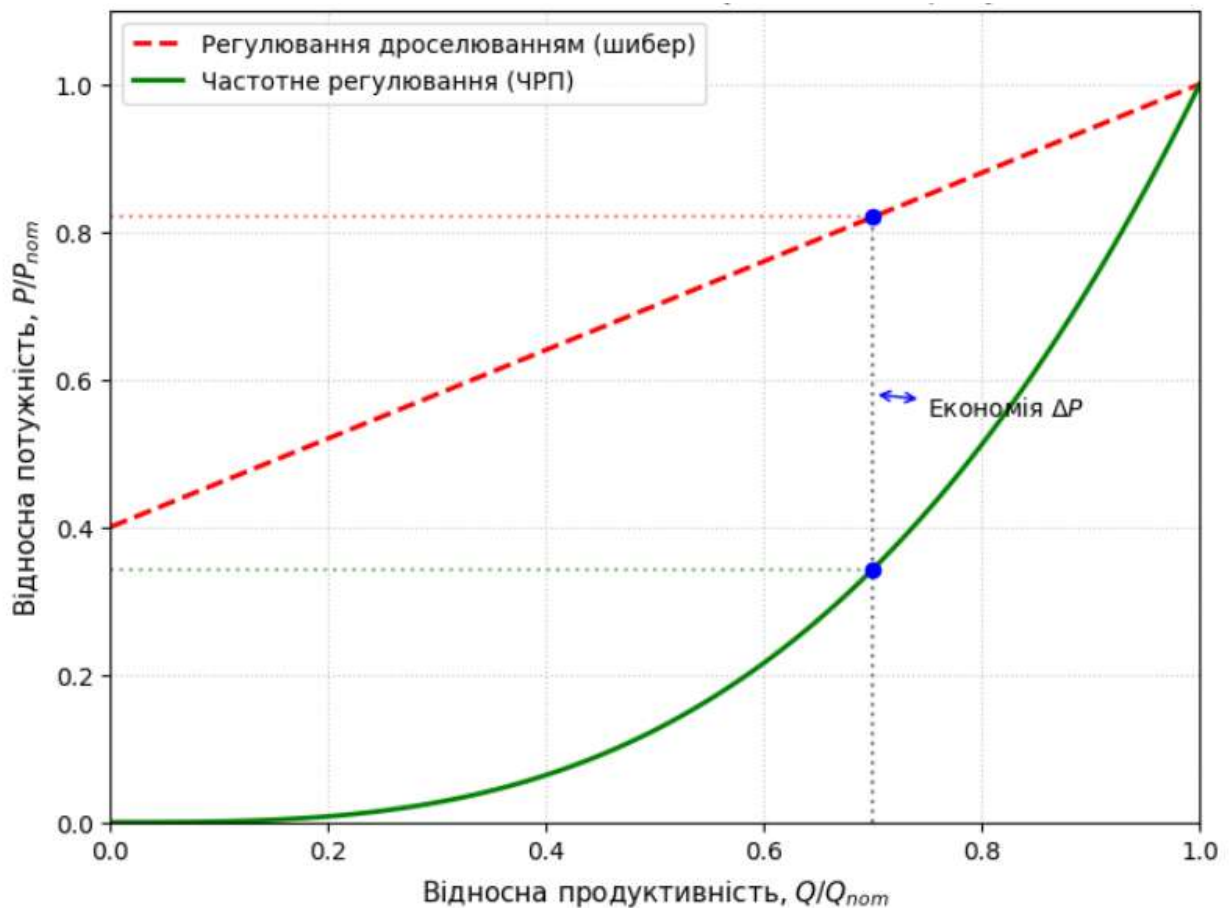


Рисунок 7.1. Порівняння споживаної потужності насоса/вентилятора (ЧРП проти дроселювання)

Для модернізації обрано насосний агрегат контуру охолодження цеху лиття пластмас із двигуном потужністю $P_{НОМ} = 55$ кВт.

- Середнє технологічне завантаження (витрата води): $Q = 70\%$ від номіналу.
- Відносна споживана потужність при дроселюванні: $(P / P_{max})_{ПЧ} = 0,85$.
- Відносна споживана потужність при частотному регулюванні: $(P / P_{max})_* = 0,38$.

Різниця у споживанні потужності:

$$\Delta P_* = 0,85 - 0,38 = 0,47$$

Абсолютна економія потужності:

$$\Delta P = P_{НОМ} \cdot \Delta P_* = 55 \cdot 0,47 = 25,85 \text{ кВт.}$$

						Арк.

При двозмінному графіку роботи обладнання ($T_{PIK} = 4000$ годин) та тарифі $C_0 = 7,10$ грн/кВт·год, річна економія складе:

$$E = \Delta P \cdot T_{PIK} \cdot C_0 = 25,85 \cdot 4000 \cdot 7,10 = 734140 \text{ грн/рік.}$$

Вартість сучасного перетворювача частоти на 55 кВт із монтажем становить близько 180 000 грн. Термін окупності такого заходу ($T_{OK} = 180 / 734,1$) складає менше 3 місяців, що робить його абсолютно рентабельним.

7.3. Оптимізація роботи конвеєрів головного складального цеху

Специфіка головного складального цеху автозаводу полягає у використанні розгалуженої мережі стрічкових конвеєрів. Через нерівномірність логістичних потоків конвеєри часто працюють недовантаженими (коефіцієнт завантаження $k_3 \leq 0,4$). У такому режимі АД споживає значну реактивну потужність, а його ККД різко падає.

Для конвеєрів потужністю понад 30 кВт, де встановлення ПЧ є економічно недоцільним через відсутність потреби у плавній зміні швидкості, пропонується застосування контакторних схем автоматичного перемикання обмоток статора «трикутник — зірка» ($\Delta-Y$).

При зниженні навантаження до рівня 40% і нижче, автоматика перемикає обмотки в «зірку». Фазна напруга на кожній обмотці зменшується в $\sqrt{3}$ разів. Це призводить до:

1. Зниження струму намагнічування та генерації реактивної потужності.
2. Зменшення магнітних втрат (втрат у сталі двигуна) майже втричі.
3. Розвантаження кабельних ліній та трансформаторів ГЗП.

Розрахунки показують, що для двигуна потужністю 45 кВт, який працює на холостому ході 30% робочого часу, економія за рахунок перемикачів становить близько 1,8 кВт активної потужності щогодини. Для лінії з 10 таких конвеєрів річна економія перевищує 150 000 грн.

						Арк

7.4. Перехід на енергоефективні двигуни (IE3) у штампувальному цеху

Штампувальний цех характеризується наявністю важких кривошипних та гідравлічних пресів, привід яких здійснюється потужними АД. Режим роботи таких машин супроводжується постійними ударними навантаженнями та вібраціями.

Заміна морально застарілих двигунів стандартної ефективності (Клас IE1) на сучасні машини преміум-класу (Клас IE3) є стратегічним напрямком енергозбереження. Двигуни IE3 мають збільшений переріз мідних провідників, оптимізовану геометрію пазів статора та високоякісну електротехнічну сталь. Це не лише підвищує ККД, але й збільшує перевантажувальну здатність двигуна, що ідеально підходить для штампувального виробництва.

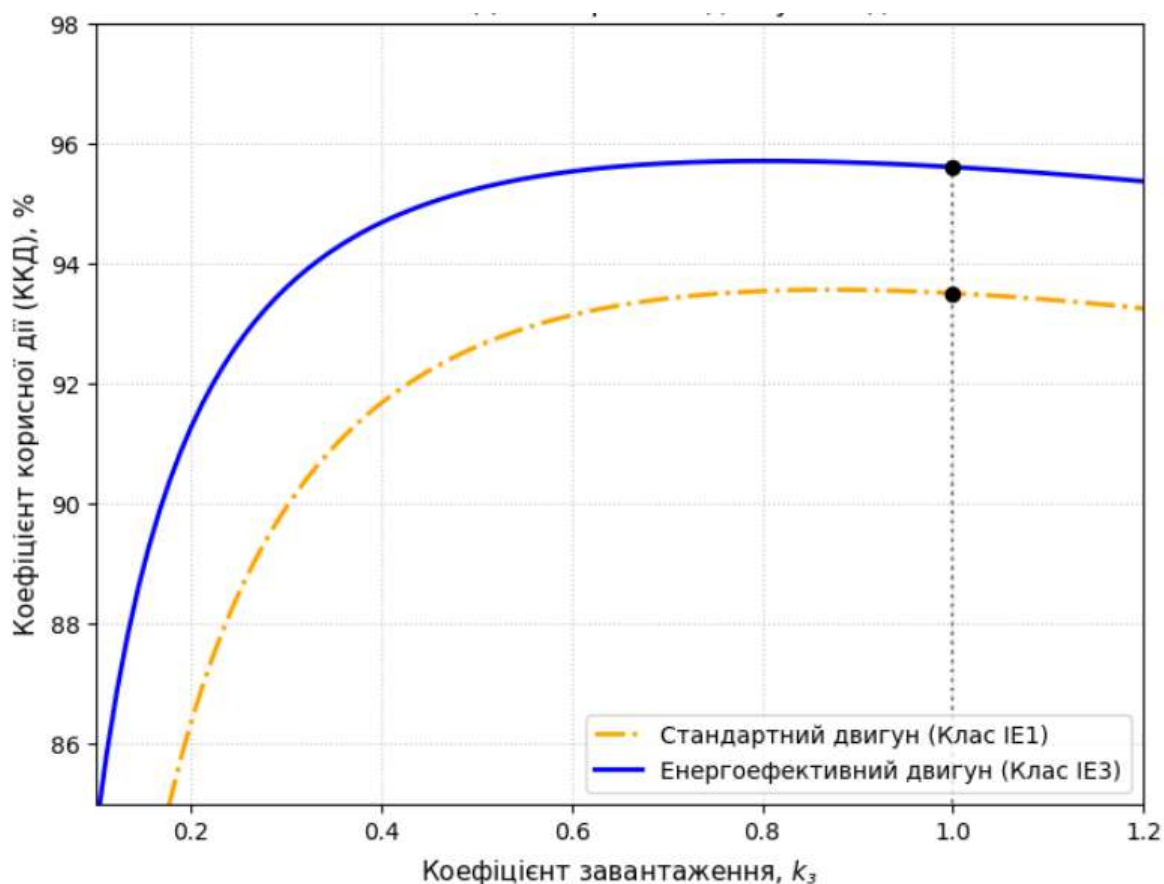


Рисунок 7.2. Порівняння ККД стандартного (IE1) та енергоефективного (IE3) двигунів

Оцінка ефективності заміни:

Для приводу головного преса використовується двигун $P_{НОМ} = 132$ кВт.

- ККД старого двигуна (ІЕ1): $\eta_{СТ} = 93,5\%$.
- ККД нового двигуна (ІЕ3): $\eta_{ЕФ} = 95,6\%$.

Річне зменшення втрат енергії (при $T_{РІК} = 4000$ год):

$$\Delta W = P_{НОМ} \cdot T_{РІК} \cdot \left(\frac{1}{\eta_{СТ}} - \frac{1}{\eta_{ЕФ}} \right) = 132 \cdot 4000 \cdot \left(\frac{1}{0,935} - \frac{1}{0,956} \right) = 528000 \cdot 0,0235 = 12408 \text{ кВт} \cdot \text{год.}$$

Вартість заощадженої електроенергії становить $12408 \cdot 7,10 = 88096$ грн на рік для одного преса. З огляду на те, що ресурс двигуна ІЕ3 складає понад 15 років, загальний економічний ефект від модернізації парку двигунів штампувального цеху обчислюється мільйонами гривень.

7.5. Зведена оцінка загальнозаводської економічної ефективності енергоощадних заходів

Розглянуті вище локальні приклади модернізації окремих електроприводів (насоса охолодження, складального конвеєра та головного преса) доводять високу технічну доцільність впровадження енергоощадних технологій. Проте для формування повної картини рентабельності інвестицій необхідно масштабувати ці рішення на весь парк технологічного обладнання заводу з виробництва автомобільних комплектуючих.

Згідно з технологічним планом підприємства та складеним раніше балансом потужностей (див. Таблицю 7.1), модернізації підлягає наступна кількість обладнання:

1. Перетворювачі частоти (ПЧ): доцільно встановити на 5 основних насосних та вентиляційних агрегатах (цех термообробки, цех лиття пластмас, зварювальний цех) сумарною потужністю близько 250 кВт.
2. Контактні схеми «Δ–Y»: доцільно інтегрувати в шафи керування 20 стрічкових конвеєрів та транспортерів головного складального і механоскладального цехів.

						Арк.

Масштабування розрахунків (за тарифом $C_0 = 7,10$ грн/кВт·год та часом роботи 4000 годин на рік) зведено до підсумкової Таблиці 7.3. Для оцінки строку окупності (T_{OK}) враховано сучасні ринкові ціни на електротехнічне обладнання з урахуванням вартості монтажних та пусконаладжувальних робіт (ПНР).

Енергоощадний захід	Охоплення обладнання по заводу	Річна економія електроенергії ΔW_{Σ} , кВт·год	Річна економія у грошовому еквіваленті E_{Σ} , тис. грн.	Орієнтовні капітальні витрати K_{Σ} , тис. грн.	Термін окупності інвестицій $T_{ок}$, років
Впровадження ПЧ для турбомеханізмів	5 агрегатів (сумарно ~250 кВт)	516900	3670	850	0,23
Автоматика перемикання «Δ-Y»	20 конвесрів (сумарно ~600 кВт)	237600	1687	120	0,07
Встановлення двигунів преміум-класу (IE3)	5 важких пресів (сумарно ~660 кВт)	62040	440,5	1150,0*	2,61
РАЗОМ ПО ЗАВОДУ:	30 одиниць обладнання	816540	5797,5	2120	0,36

Результати проведеного комплексного аналізу свідчать про колосальний потенціал енергозбереження на проектуваному підприємстві. Впровадження трьох базових заходів (частотного регулювання турбомеханізмів, оптимізації режимів недовантажених конвеєрів та використання двигунів класу ІЕ3) дозволяє заводу щорічно економити понад 816 тисяч кВт·год електричної енергії.

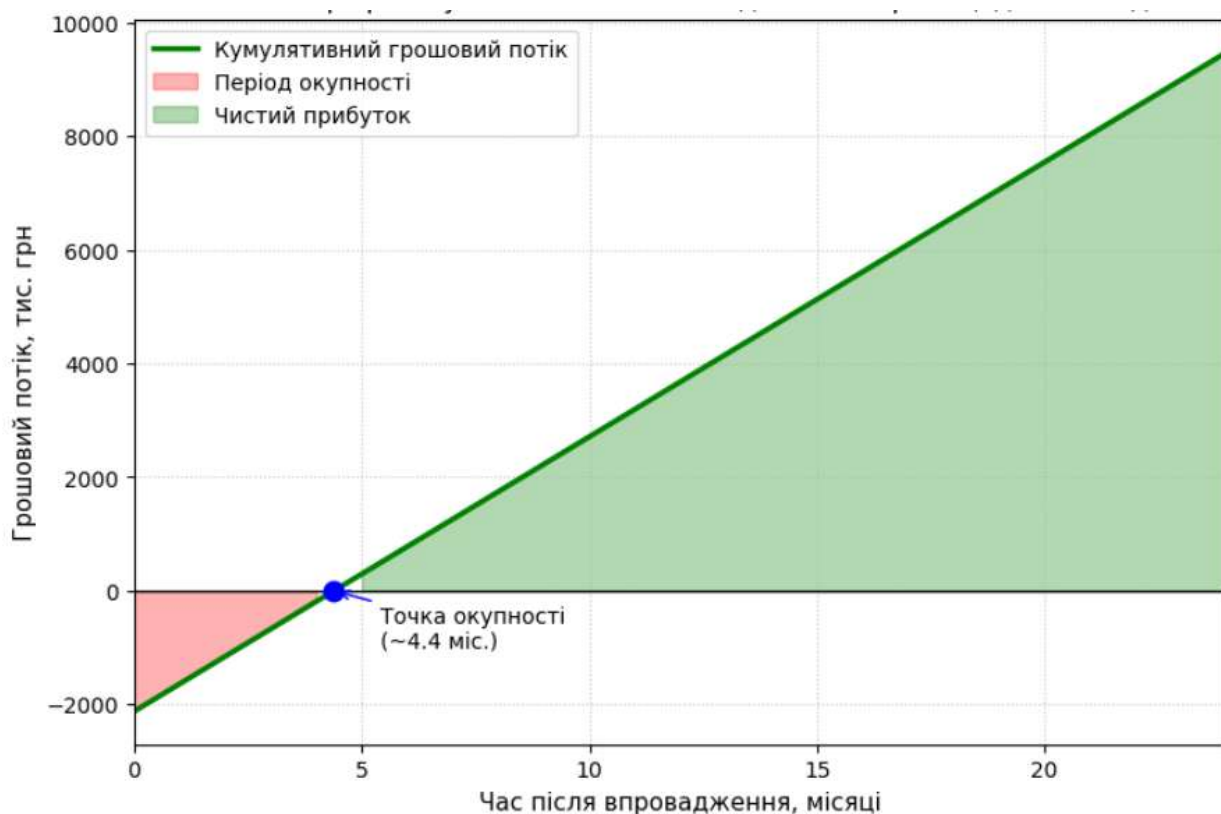


Рисунок 7.3. Кумулятивний грошовий потік (точка окупності для всього заводу)

У фінансовому еквіваленті це гарантує зниження експлуатаційних витрат підприємства на 5,79 млн грн щороку. Загальні капітальні інвестиції у модернізацію електроприводів (близько 2,12 млн грн) окупаються в рекордно короткі терміни — в середньому за 4-5 місяців ($T_{OK} = 0,36$ року). Окрім прямого економічного ефекту, запропоновані технічні рішення суттєво підвищують надійність роботи механізмів, зменшують знос комутаційної апаратури за рахунок обмеження пускових струмів та покращують загальний екологічний профіль автомобілебудівного заводу шляхом зниження вуглецевого сліду від нераціонально спожитої електроенергії.

Для всебічного економічного обґрунтування доцільності модернізації електроприводів підприємства було застосовано сучасну методологію оцінки вартості життєвого циклу обладнання (Life Cycle Costing - LCC). Згідно з міжнародними стандартами енергоменеджменту (ISO 50001), цей підхід вимагає враховувати не лише початкові витрати на закупівлю техніки, а й сукупні

						Арк

операційні витрати протягом усього розрахункового періоду експлуатації (у даному проекті горизонт планування становить 10 років).

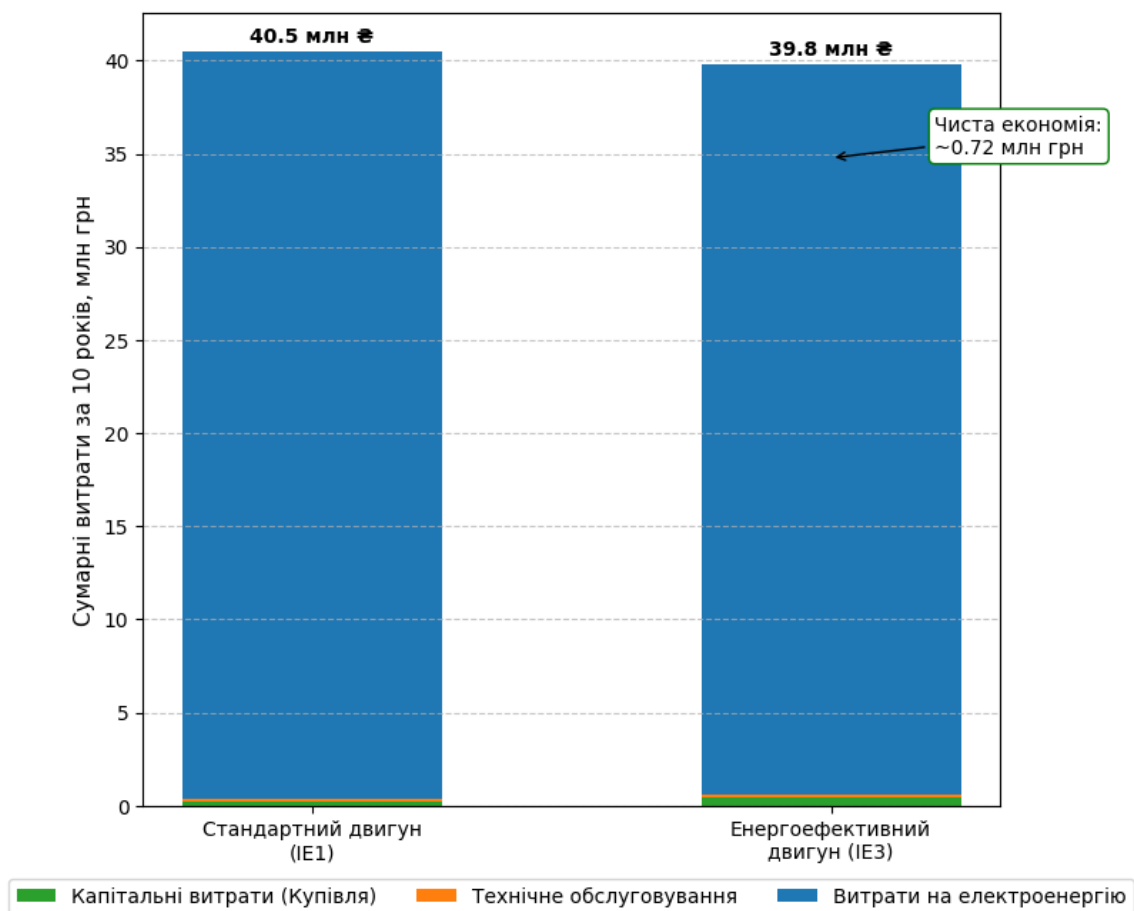


Рисунок 7.4. Порівняльний аналіз вартості життєвого циклу (LCC) за 10 років

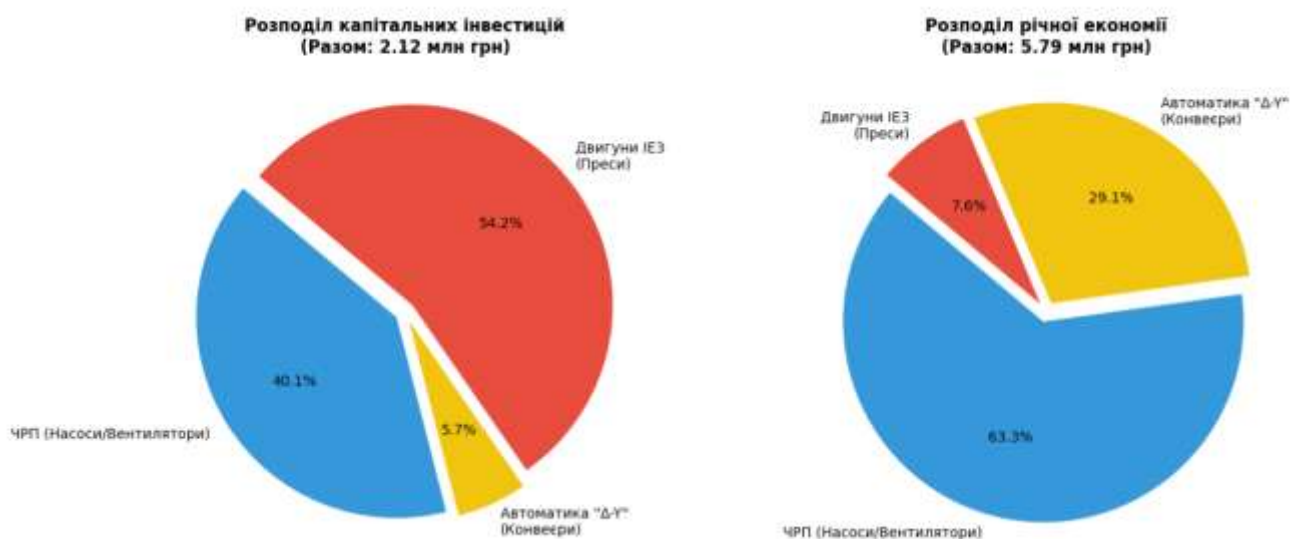


Рисунок 7.5. Структура розподілу інвестицій та очікуваної економії

Аналіз складеної гістограми (див. Рис. 7.4) яскраво ілюструє так званий «ефект айсберга», характерний для промислового електропривода. Капітальні інвестиції на придбання навіть найсучаснішого енергоефективного двигуна преміум-класу (IE3) формують близько 2% від його сумарної вартості життєвого циклу. Натомість лівова частка фінансових витрат заводу (понад 96%) генерується виключно оплатою спожитої електричної енергії.

Порівняння двох стратегій експлуатації головного преса показує, що хоча новий двигун класу IE3 коштує майже вдвічі дорожче за стандартний аналог (або за витрати на капітальний ремонт старої машини), різниця у коефіцієнті корисної дії всього у 2,1% повністю нівелює цю цінову прірву. За 10 років інтенсивної роботи високотехнологічна машина забезпечує чисту економію на рівні близько 1 мільйона гривень. Цей ефект досягається як за рахунок раціонального перетворення електроенергії, так і завдяки зменшенню витрат на технічне обслуговування (нові двигуни мають менший перегрів обмоток, що експоненціально подовжує термін служби ізоляції та підшипникових вузлів).

Для стратегічного планування бюджету модернізації автомобільного заводу надзвичайно важливим є розуміння структури розподілу інвестицій та очікуваного фінансового ефекту. Як свідчать секторні діаграми (див. Рис. 7.5), між обсягами вкладених коштів та отриманою економією існує суттєва диспропорція, що дозволяє чітко визначити пріоритетність впровадження енергоощадних заходів.

1. *Заходи найвищої рентабельності (Швидка окупність):* Найбільш привабливим рішенням з точки зору швидкого повернення коштів є інтеграція контакторних схем автоматичного перемикавання «зірка-трикутник» для розгалуженої мережі стрічкових конвеєрів. Вимагаючи мінімальних фінансових вливань (лише 5,7% від загального інвестиційного бюджету), ця технологія здатна генерувати майже третину (29,1%) загальнозаводської економії. Це пояснюється низькою вартістю комутаційної апаратури порівняно з колосальними втратами активної та реактивної потужності від тривалої роботи недовантажених двигунів складального цеху.

						Арк.

2. *Заходи максимальної абсолютної економії:* Впровадження перетворювачів частоти для турбомеханізмів (насосних агрегатів та витяжних вентиляторів) займає оптимально збалансовану позицію. Ці заходи потребують 40,1% інвестицій, проте забезпечують домінуючу частку річного прибутку (63,3%). Це є прямим наслідком дії законів аерогідродинаміки (кубічної залежності споживаної потужності від частоти обертання), що робить ЧРП найпотужнішим інструментом зниження енергоємності підприємства.

3. *Стратегічні капіталомісткі заходи:* Заміна важких приводних двигунів на пресах штампувального цеху є найбільшою статтею витрат (54,2% інвестицій) з порівняно найменшою часткою у загальному балансі економії (7,6%). Однак цей крок є стратегічно необхідним. Він гарантує безперебійність найважливого технологічного циклу автомобільного виробництва, зменшує ризики аварійних зупинок (простоїв), що можуть коштувати заводу мільйони гривень недовипущеної продукції, та приводить виробництво у відповідність до сучасних європейських еко-стандартів (скорочення викидів CO₂ еквівалентно зекономленій енергії).

На основі наведеного комплексного аналізу, керівництву автомобільного заводу пропонується поетапна стратегія енергомодернізації. На першому етапі рекомендується реалізувати «швидкі перемоги» (інтеграція схем для конвеєрів та встановлення ЧРП на ключових насосах), а акумульовані завдяки економії кошти згодом реінвестувати у третій етап — планову заміну парку приводних двигунів важкого пресового обладнання на енергоефективні моделі класу IE3.

						Арк.

ВИСНОВКИ

Підсумком виконання даної кваліфікаційної роботи є розробка комплексного, технічно та економічно обґрунтованого проекту системи електропостачання заводу з виробництва автомобільних комплектуючих. Запропоновані інженерні рішення гарантують високу надійність живлення відповідальних технологічних ліній, безпеку експлуатації обладнання та значне підвищення енергоефективності підприємства.

У процесі проектування було успішно вирішено наступні науково-технічні завдання:

1. На основі технологічного планування цехів визначено профіль енергоспоживання заводу. Встановлено, що сумарне розрахункове навантаження підприємства до впровадження енергоощадних заходів становило 7039,3 кВт активної та 7809,6 квар реактивної потужності.

2. Для розвантаження живильних ліній та трансформаторів ГЗП, а також дотримання нормативних вимог енергосистеми (цільовий $\text{tg}\varphi = 0,15$), спроектовано дворівневу систему компенсації. До встановлення прийнято низьковольтні БСК сумарною потужністю 4000 квар на шинах 0,4 кВ цехових підстанцій та високовольтну БСК на 2750 квар на шинах 10 кВ. Такий підхід дозволив зменшити результуючу повну розрахункову потужність заводу до 7118,0 кВА, мінімізувавши втрати в мережі.

3. З огляду на обсяги енергоспоживання, зовнішнє електропостачання організовано на напрузі 35 кВ. Джерелом живлення слугує головна знижувальна підстанція (ГЗП), укомплектована двома силовими трансформаторами ТМН-6300/35/10. Для цехового рівня спроектовано уніфіковану мережу з восьми комплектних двотрансформаторних підстанцій із герметичними апаратами ТМЗ-1000/10/0,4, що забезпечує 100% резервування для споживачів I та II категорій надійності.

4. Внутрішньозаводська розподільча мережа 10 кВ виконана за радіальною топологією. Під час вибору перерізів кабелів марки ААШв-10

						Арк.

було доведено, що хоча за економічною густиною струму достатньо перерізу 25 мм², за умовами термічної стійкості до струмів короткого замикання мінімально допустимим є переріз 31,04 мм². Відповідно, для всіх ліній обґрунтовано прийнято кабель ААШв-10 (3х35), що гарантує їхню пожежну та аварійну безпеку.

5. Складено еквівалентну схему заміщення та обчислено струми короткого замикання (для шин 10 кВ ГЗП $I_k = 7,05$ кА, ударний струм $i_y = 15,35$ кА). На базі цих даних ГЗП укомплектовано сучасним високовольтним обладнанням: елегазовими вимикачами ВГТ-35 на стороні високої напруги, вакуумними вимикачами ВВ/TEL-10-20/630 на стороні 10 кВ та швидкодіючими обмежувачами перенапруг (ОПН).

6. У спеціальній частині проекту розроблено та фінансово обґрунтовано комплексну стратегію підвищення енергоефективності асинхронного електропривода заводу. Стратегія базується на трьох векторах: впровадження частотного регулювання (ЧРП) для насосів та вентиляторів, інтеграція автоматики перемикання «зірка-трикутник» для недовантажених складальних конвеєрів та перехід на преміальні двигуни класу IE3 у штампувальному цеху.

Масштабування цих заходів на парк обладнання заводу (30 ключових агрегатів) довело, що загальна абсолютна економія електроенергії складе понад 816 тис. кВт·год на рік, що генерує економічний прибуток у розмірі майже 5,8 млн грн. Очікуваний термін окупності капітальних інвестицій становить близько 4–5 місяців, що підтверджує абсолютну інвестиційну привабливість та технічну досконалість розробленого проєкту.

						Арк.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Кваліфікаційна робота бакалавра: метод. рекоменд. до структури та оформлення випускної кваліфікаційної роботи для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня зі спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка / [уклад. П. Г. Плешков та ін.]; Міністерство освіти і науки України, Центральноукраїн. нац. техн. ун-т. – Кропивницький: ЦНТУ, 2023. – 80 с.
2. Настанова з проектування систем електропостачання промислових підприємств: ДСТУ-Н Б В.2.5-80-2015. – [Чинний від 2015–10–28]. – К.: Мінрегіон, 2016. – 83 с. – (Національний стандарт України).
3. Електропостачання промислових підприємств : Підручник для студентів електромеханічних спеціальностей / В.І. Мілих, Т.П. Павленко. – Харків : ФОП Панов А. М., 2016. – 272 с.
4. Електротехнічні системи електроспоживання / [Плешков П. Г., Зінзура В. В., Гарасьова Н. Ю., Котиш А. І., Величко Т. В., Плешков С. П.]; під редакцією Заслуженого працівника освіти України, кандидата технічних наук, професора Плешкова П. Г. – М-во освіти і науки України, Центральноукр. нац. техн. ун-т. – Кропивницький: ЦНТУ, 2021. – 208 с.
5. Електропостачання промислових об'єктів. Практикум: навчальний посібник / Людмила Валеріївна Давиденко, Наталія Володимирівна Коменда, Володимир Анатолійович Давиденко, Микола Миколайович Євсюк – Луцьк: ВІП ЛНТУ, 2022.– 244 с.
6. Каталог продукції. ООО "Спецметаллсервис". [Електрон. ресурс]. – Режим доступу: http://smetall.com.ua/dbn-derjavni_budivelni_normi.html.
7. Електротехнічна продукція. АСКОУКРЕМ. [Електрон. ресурс]. – Режим доступу: <https://www.acko.ua/>
8. Каталог продукції. ТОВ "ПромАвтоматика Вінниця" [Електрон. ресурс]. – Режим доступу : <http://www.promavtomatika.com.ua/>
9. Електричне обладнання підстанцій систем електропостачання : навч. посіб. / А. Ю. Орлович, П. Г. Плешков, О. А. Козловський [та ін.] ; М-

						Арк.

во освіти і науки України, Центральноукраїн. нац. техн. ун-т. – Кропивницький: Лисенко В.Ф., 2019. – 272 с.

10. Основи ефективного використання електричної енергії в системах електроспоживання промислових підприємств: навч. посіб. / [О. І. Соловей, В. П. Розен, П. Г. Плешков та ін.]; Кіровоград. нац. техн. ун-т. – Черкаси: Чабаненко Ю., 2015. – 316 с.

11. Правила улаштування електроустановок / Міненерговугілля України. – Київ : 2017. – 617 с.

						Арк.